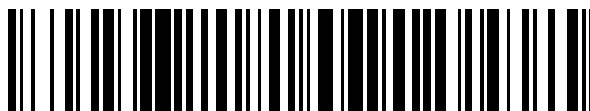


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 817 801**

51 Int. Cl.:

C21D 9/04 (2006.01)

C22C 38/02 (2006.01)

C22C 38/04 (2006.01)

C22C 38/12 (2006.01)

C22C 38/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.12.2010** **PCT/US2010/060186**

87 Fecha y número de publicación internacional: **07.07.2011** **WO11081901**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.12.2010** **E 10795554 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.06.2020** **EP 2513347**

54 Título: **Procedimiento de fabricación de un riel de acero hipereutectoide endurecido en la cabeza**

30 Prioridad:

14.12.2009 US 286264 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
08.04.2021

73 Titular/es:

ARCELORMITTAL (100.0%)
24-26 Boulevard d'Avranches
1160 Luxembourg, LU

72 Inventor/es:

BRAMFITT, BRUCE L.;
FLETCHER, FRED B. y
DAVIS, JR., JOHN A.

74 Agente/Representante:

SALVÀ FERRER, Joan

ES 2 817 801 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

Procedimiento de fabricación de un riel de acero hipereutectoide endurecido en la cabeza

5 CAMPO DE LA INVENCION

[0001] La presente invención se refiere a un procedimiento de fabricación de un riel de acero hipereutectoide endurecido en la cabeza.

10 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

[0002] Los ferrocarriles de los Estados Unidos, especialmente los ferrocarriles de clase 1 (BN, UP, CSX, NS, CP y CN) exigen niveles de dureza más altos y dureza más profunda en la cabeza del riel de ferrocarril para mejorar la vida útil en la vía (una dureza más alta proporciona una mejor resistencia al desgaste). La American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) es una de las organizaciones reconocidas por promulgar especificaciones ferroviarias en América del Norte. Existen tres tipos de acero para rieles AREMA basados en propiedades mínimas: resistencia estándar, resistencia intermedia y alta resistencia. Las propiedades mínimas para cada tipo de acero se establecen en la siguiente tabla:

Propiedad especificada	Resistencia estándar	Resistencia intermedia	Alta resistencia
Dureza, Brinell HB (HRC)	310 (30,5)	325 (32,5)	370 (38,3)
Límite elástico, ksi	74	80	120
Resistencia a la tracción, ksi	142,5	147	171
Alargamiento (en 2"), %	10	8	10

20

[0003] La dureza se especifica únicamente en la cabeza del riel. Las propiedades anteriores, tal como se informan y miden en esta invención, se someten a prueba según los estándares de AREMA establecidos en AREMA parte 2, fabricación de rieles (2007). Para cumplir con los estándares AREMA de alta resistencia, el riel debe tener una microestructura completamente perlítica sin que se permita sustancialmente la martensita sin templear. Generalmente, el alargamiento debe ser del 10 % o más para el acero de riel de alta resistencia, aunque un número relativamente pequeño (por ejemplo, aproximadamente el 5 %) de rieles puede tener un alargamiento menor al 10 % pero no menor al 9 %.

[0004] El grado más difícil de producir es el grado de alta resistencia. Algunos productores de rieles se esfuerzan por lograr las propiedades requeridas del acero de alta resistencia a través del enfriamiento acelerado del riel directamente en línea después del laminador. Otros productores recalientan el riel a temperatura ambiente y a continuación aplican enfriamiento acelerado (un procedimiento fuera de línea). El procedimiento de enfriamiento del riel se denomina endurecimiento de la cabeza. En los Estados Unidos, los procedimientos de enfriamiento que se ponen en práctica actualmente utilizan pulverizadores de agua para enfriar el riel o colectores de aire de alto volumen. En todos los procedimientos de endurecimiento de la cabeza, el riel se enfría a una velocidad de enfriamiento moderada para formar una microestructura perlítica fina y evitar la formación de martensita sin templear que no está permitida por AREMA. Por ejemplo, el documento JP2000-178690 describe un procedimiento para la producción de rieles ferroviarios con un enfriamiento acelerado.

[0005] Además del enfriamiento acelerado para desarrollar una separación interlaminar de perlita fina, es conocido añadir elementos de aleación al acero del riel para aumentar la dureza. Tradicionalmente durante la última década, se ha conocido en los Estados Unidos el uso de acero endurecido en la cabeza de alta resistencia que contiene 0,80-0,84 % en peso de C, 0,80-1,1 % en peso de Mn, 0,20-0,40 % en peso de Si y 0,20-0,25 % en peso de Cr. El alto nivel de carbono de 0,80-0,84 % en peso proporciona la microestructura perlítica y a este nivel de carbono el acero está en o ligeramente por encima del punto eutectoide del diagrama de fase binaria hierro-carbono. El carbono es esencial porque la microestructura perlítica que se desarrolla contiene aproximadamente un 12 % en peso de carburo de hierro (cementita) en forma de plaquetas incrustadas junto con plaquetas de ferrita (formando una morfología laminar). Las plaquetas de cementita proporcionan dureza y resistencia al desgaste.

[0006] Hace tiempo que se sabe que los aumentos adicionales en el carbono pueden proporcionar una mayor dureza de la perlita a medida que aumenta la fracción de volumen de la fase de cementita dura. Sin embargo, cuando el acero tiene un nivel de carbono que está por encima del punto eutectoide, la cementita puede formarse en los límites de grano austenítico anteriores. Esta forma de cementita se llama cementita proeutectoide y el acero se conoce como acero hipereutectoide. La ductilidad reducida puede producirse en aceros hipereutectoides si se desarrolla una red continua de cementita proeutectoide en los límites de grano austenítico anteriores, lo que hace que el acero sea quebradizo e inaceptable como riel ferroviario.

RESUMEN DE LA INVENCION

[0007] Un aspecto de la invención proporciona un procedimiento para fabricar un riel de acero hipereutectoide endurecido en la cabeza según la reivindicación 1.

5 **[0008]** Opcionalmente, la velocidad de enfriamiento de 0 segundos a 20 segundos trazada en la gráfica tiene un promedio dentro de un intervalo de 5-10 °C/s, y la velocidad de enfriamiento de 20 segundos a 110 segundos trazada en la gráfica es mayor que una velocidad de enfriamiento de aire comparable.

10 **[0009]** Opcionalmente, la composición del riel de acero, que comprende opcionalmente aluminio, se forma a una temperatura de aproximadamente 1600 °C a aproximadamente 1650 °C mediante la adición secuencial de manganeso, silicio, carbono, aluminio, seguido de titanio y vanadio en cualquier orden o combinación.

15 **[0010]** Otros aspectos de la descripción, que incluyen aparatos, sistemas, artículos, composiciones, procedimientos y similares que forman parte de la descripción, se harán más evidentes al leer la siguiente descripción detallada de las realizaciones ejemplares y ver los dibujos.

BREVE DESCRIPCIÓN DEL DIBUJO O DIBUJOS

20 **[0011]** Los dibujos adjuntos se incorporan y constituyen una parte de la memoria descriptiva. Los dibujos, junto con la descripción general dada anteriormente y la descripción detallada de las realizaciones ejemplares y procedimientos dados a continuación, sirven para explicar los principios de la invención. En dichos dibujos:

25 La figura 1 es una gráfica de coordenadas xy con un eje x que representa el tiempo de enfriamiento en segundos y el eje y que representa la temperatura en grados Celsius de la superficie del riel de acero, donde un límite de temperatura superior se define por el enfriamiento de 775 °C a 670 °C durante un período de 20 segundos (a 5,3 °C/s) y 670 °C a 550 °C durante un período posterior de 90 segundos (a 1,3 °C/s) y un límite de temperatura inferior se define por el enfriamiento de 750 °C a 610 °C durante un período de 20 segundos (a 7,0 °C/s) y 610 °C a 500 °C durante un período de 90 segundos (1,2 °C/s).

30 La figura 2 es una gráfica que muestra una comparación del perfil de dureza a lo largo de la línea central vertical de la cabeza del riel. Cada punto de datos representa una medición de dureza a incrementos de 1/8" (pulgada) desde la superficie superior. La línea de puntos horizontal representa la dureza mínima de AREMA de 38,3 HRC (370 HB).

La figura 3 es un esquema de una máquina de endurecimiento de la cabeza que muestra la ubicación de las secciones de enfriamiento independientes y los pirómetros según una realización de la descripción.

35 La figura 4 es una gráfica que representa las lecturas del pirómetro de un riel que pasa a través de la máquina de endurecimiento de la cabeza de la figura 3. Se muestran las cuatro secciones de la máquina. Como se puede observar, la velocidad de enfriamiento se ralentiza a aproximadamente 650 °C debido a que el calor se genera por la transformación de austenita en perlita. La velocidad de enfriamiento que entra en transformación es de 7,3 °C/s.

40 La figura 5 es una gráfica que representa una transformación de enfriamiento continuo (CCT) o diagrama TTT de acero eutectoide (0,8 % de C). La línea de puntos horizontal a 540 °C separa la transformación de perlita (P) de la transformación de bainita (B). Las líneas rectas sólidas representan una hipotética curva de enfriamiento (como la que se muestra en la figura 4) donde el riel se enfría a través de la "nariz" del diagrama CCT. Ps y Pf son las curvas de inicio y final de perlita, respectivamente.

45 La figura 6A es una representación gráfica de un procedimiento de endurecimiento de la cabeza según una realización de la invención, y la figura 6B representa una distribución de las propiedades de dureza medidas de la realización.

La figura 7A es una representación gráfica de un procedimiento de endurecimiento de la cabeza según un ejemplo comparativo, y la figura 7B representa una distribución de las propiedades de dureza medidas del ejemplo comparativo.

50 La figura 8A es una representación gráfica de un procedimiento de endurecimiento de la cabeza según un ejemplo comparativo, y la figura 8B representa una distribución de las propiedades de dureza medidas del ejemplo comparativo.

55 La figura 9 es una sección transversal de una cabeza de riel según una realización de la descripción.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE REALIZACIONES EJEMPLARES Y PROCEDIMIENTOS EJEMPLARES

60 **[0012]** A continuación, se hará referencia en detalle a realizaciones ejemplares y procedimientos de la invención como se ilustra en los dibujos adjuntos, en los que caracteres de referencia similares designan partes similares o correspondientes a lo largo de los dibujos. Cabe señalar, sin embargo, que la invención en sus aspectos más amplios no se limita a los detalles específicos, artículos y procedimientos representativos y los ejemplos ilustrativos mostrados y descritos en relación con las realizaciones ejemplares y procedimientos. La invención solo está limitada por el alcance de las reivindicaciones adjuntas.

65 **[0013]** Las realizaciones ejemplares de la invención se refieren a una composición de riel hipereutectoide que

contiene niveles relativamente altos de silicio y vanadio. En la producción, el riel se puede enfriar aceleradamente para lograr una alta dureza, rendimiento y resistencia a la tracción significativamente más allá de la especificación actual de AREMA para rieles de alta resistencia. Las composiciones de acero ejemplares muestran una o más de cuatro características diferentes pero interrelacionadas. En realizaciones particularmente ejemplares, las cuatro características son todas poseídas simultáneamente por el acero para proporcionar las propiedades que se muestran y explican a continuación. Estas cuatro características simultáneas son:

[0014] (1) Mayor dureza sobre el acero convencional C-Mn-Si endurecido en la cabeza a través de los niveles más altos de carbono y silicio y la adición de vanadio. Se cree que el carbono aumenta el porcentaje de volumen de cementita dura, el silicio endurece la fase de ferrita en la perlita a través del fortalecimiento de la solución sólida, y el vanadio proporciona endurecimiento por precipitación de la fase de ferrita perlítica a través de la formación de carburos de vanadio.

[0015] (2) Supresión de redes de cementita proeutectoide continuas dañinas en los límites de grano de austenita anteriores. Sin la supresión de la cementita proeutectoide, el acero mostrará una ductilidad y tenacidad disminuidas. Niveles más altos de silicio alteran la actividad del carbono en la austenita y por lo tanto suprimen la formación de cementita proeutectoide en los límites. Se cree que la adición de vanadio a través de su combinación con carbono altera la morfología de la cementita proeutectoide para producir partículas discretas en lugar de redes continuas. La supresión de las redes de cementita proeutectoide también se ve afectada por una alta velocidad de enfriamiento durante la transformación de austenita.

[0016] (3) Eliminación de la formación de ferrita blanda en la superficie del riel durante la descarburación. Las prácticas de calentamiento a altas temperaturas pueden crear naturalmente condiciones oxidantes que causan descarburación. El nivel de carbono más alto del acero ejemplificado descrito en esta invención es suficiente para permitir que se lleve a cabo la descarburación, pero insuficiente para causar suficiente pérdida de carbono para permitir que el acero se vuelva hipoeutectoide donde se forma ferrita proeutectoide blanda.

[0017] (4) Prevención de la inestabilidad de la transferencia de calor y reducción de los productos de transformación. Al cambiar la transformación de perlita a tiempos más cortos, se puede emplear una mayor velocidad de enfriamiento sin generar inestabilidad de transferencia de calor indeseable y microestructuras bainíticas/martensíticas. Bajar el nivel de manganeso a dentro de los niveles analizados en esta invención logra este cambio.

[0018] Generalmente, en realizaciones ejemplares se proporciona una nueva composición de riel hipereutectoide que comprende, consiste esencialmente en y/o consiste en los elementos y concentraciones de peso que se establecen a continuación en la tabla 1:

Tabla 1

carbono	0,86-1,00 % en peso
manganeso	0,40-0,75 % en peso
silicio	0,40-1,00 % en peso
cromo	0,20-0,30 % en peso
vanadio	0,05-0,15 % en peso
titanio	0,015-0,030 % en peso
nitrógeno	0,0050-0,0150 % en peso

[0019] La formulación anterior puede modificarse para proporcionar carbono en un intervalo de 0,90-1,00 % en peso.

[0020] El carbono es esencial para lograr las propiedades del riel de alta resistencia AREMA. El carbono se combina con el hierro para formar carburo de hierro (cementita). El carburo de hierro contribuye a una alta dureza y transmite alta resistencia al acero del riel. Con un alto contenido de carbono (por encima de aproximadamente el 0,8 % en peso de C, opcionalmente por encima del 0,9 % en peso), una fracción de mayor volumen de carburo de hierro (cementita) continúa formándose por encima de la del acero eutectoide convencional (perlítico). Una forma de utilizar el mayor contenido de carbono en el nuevo acero es mediante enfriamiento acelerado (endurecimiento de la cabeza) y la supresión de la formación de redes de cementita proeutectoide dañinas en los límites de grano de austenita. Como se analiza más adelante, el nivel de carbono más alto también evita la formación de ferrita blanda en la superficie del riel mediante descarburación normal. En otras palabras, el acero tiene suficiente carbono para evitar que la superficie del acero se convierta en hipoeutectoide. Los niveles de carbono superiores al 1 % en peso pueden crear redes de

cementita indeseables.

[0021] El manganeso es un desoxidante del acero líquido y se añade para inmovilizar al azufre en forma de sulfuros de manganeso, evitando así la formación de sulfuros de hierro que son frágiles y perjudiciales para la ductilidad en caliente. El manganeso también contribuye a la dureza y resistencia de la perlita al retardar la nucleación de la transformación de perlita, reduciendo así la temperatura de transformación y desacelerando la separación de perlita interlaminar. Los altos niveles de manganeso (por ejemplo, por encima del 1 %) pueden generar segregación interna indeseable durante la solidificación y microestructuras que degradan las propiedades. En realizaciones ejemplares, el manganeso se reduce desde un nivel de composición de acero endurecido en la cabeza convencional para cambiar la "nariz" del diagrama de transformación de enfriamiento continuo (CCT) a tiempos más cortos. Con referencia a la figura 5, la curva se desplaza hacia la izquierda. Generalmente, más perlita y menores productos de transformación (por ejemplo, bainita) se forman cerca de la "nariz". Según realizaciones ejemplares, la velocidad de enfriamiento inicial se acelera para aprovechar este cambio, las velocidades de enfriamiento se aceleran para formar la perlita cerca de la nariz. El funcionamiento del procedimiento de endurecimiento de la cabeza a velocidades de enfriamiento más altas promueve una microestructura perlítica más fina (y más dura). Sin embargo, cuando se opera a velocidades de enfriamiento más altas hay problemas ocasionales con la inestabilidad de la transferencia de calor donde el riel se sobreenfría y se vuelve insatisfactorio debido a la presencia de bainita o martensita. Con la nueva composición de estas realizaciones ejemplares, el endurecimiento de la cabeza se puede llevar a cabo a velocidades de enfriamiento más altas sin la aparición de inestabilidad. Por lo tanto, el manganeso se mantiene por debajo del 0,75 % para disminuir la segregación y evitar microestructuras indeseables. El nivel de manganeso se mantiene preferentemente por encima de aproximadamente 0,40 % en peso para inmovilizar el azufre a través de la formación de sulfuro de manganeso. El alto contenido de azufre puede crear altos niveles de sulfuro de hierro y conducir a una mayor fragilidad.

[0022] El silicio es otro desoxidante del acero líquido y es un potente reforzador de la solución sólida de la fase de ferrita en la perlita (el silicio no se combina con la cementita). El silicio también suprime la formación de redes de cementita proeutectoide continuas en los límites de grano de austenita anteriores mediante la alteración de la actividad del carbono en la austenita. El silicio está presente preferentemente a un nivel de al menos aproximadamente el 0,4 % en peso para evitar la formación de redes y a un nivel no mayor al 1,0 % en peso para evitar la fragilización durante la laminación en caliente.

[0023] El cromo proporciona un fortalecimiento de la solución sólida en las fases de ferrita y cementita de la perlita.

[0024] El vanadio se combina con el exceso de carbono para formar carburo de vanadio (carbonitruro) durante la transformación para mejorar la dureza y fortalecer la fase de ferrita en la perlita. El vanadio compite eficazmente con el hierro por carbono, evitando así la formación de redes continuas de cementita. El carburo de vanadio refina el tamaño de grano austenítico y actúa para romper la formación continua de redes de cementita proeutectoide en los límites de grano de austenita, particularmente en presencia de los niveles de silicio puestos en práctica por las realizaciones ejemplares de la invención. Los niveles de vanadio por debajo del 0,05 % en peso producen un precipitado insuficiente de carburo de vanadio para suprimir las redes continuas de cementita. Los niveles superiores al 0,15 % en peso pueden ser perjudiciales para las propiedades de alargamiento del acero.

[0025] El titanio se combina con nitrógeno para formar precipitados de nitruro de titanio que fijan los límites de grano de austenita durante el calentamiento y laminación del acero, evitando así el crecimiento excesivo del grano austenítico. Este refinamiento del grano es importante para restringir el crecimiento del grano de austenita durante el calentamiento y laminación de los rieles a temperaturas de acabado superiores a 900 °C. El refinamiento de granos proporciona una buena combinación de ductilidad y resistencia. Los niveles de titanio por encima del 0,015 % en peso son favorables al alargamiento por tracción, produciendo valores de alargamiento superiores al 10 %, tales como 10-12 %. Los niveles de titanio por debajo del 0,015 % en peso pueden reducir el promedio de alargamiento por debajo del 10 %. Los niveles de titanio por encima del 0,030 % en peso pueden producir grandes partículas de TiN potencialmente dañinas.

[0026] El nitrógeno es importante combinarlo con el titanio para formar precipitados de TiN. Típicamente, una cantidad de impureza de nitrógeno de origen natural está presente en el procedimiento de fusión de horno eléctrico. Puede ser deseable añadir nitrógeno adicional a la composición para llevar el nivel de nitrógeno por encima del 0,0050 % en peso, que es típicamente un nivel de nitrógeno suficiente para permitir que el nitrógeno se combine con titanio para formar precipitados de nitruro de titanio. Generalmente, no son necesarios niveles de nitrógeno superiores al 0,0150 % en peso.

Procesamiento y endurecimiento de la cabeza

[0027] Generalmente, la fabricación de acero puede realizarse en un intervalo de temperatura lo suficientemente alto como para mantener el acero en una etapa fundida. Por ejemplo, la temperatura puede estar en un intervalo de aproximadamente 1600 °C a aproximadamente 1650 °C. Los elementos de aleación pueden añadirse

al acero fundido en cualquier orden particular, aunque es deseable disponer la secuencia de adición para proteger determinados elementos tales como titanio y vanadio de la oxidación. Según una realización ejemplar, el manganeso se añade primero como ferromanganeso para desoxidar el acero líquido. A continuación, se añade silicio en forma de ferrosilicio para desoxidar adicionalmente el acero líquido. A continuación, se añade carbono, seguido de aluminio para una mayor desoxidación. El vanadio y el titanio se añaden en las etapas penúltima y última, respectivamente. Después de añadir los elementos de aleación, el acero puede desgasificarse al vacío para eliminar adicionalmente el oxígeno y otros gases potencialmente dañinos, tales como el hidrógeno.

[0028] Una vez desgasificado, el acero líquido puede colarse en palancones (por ejemplo, 370 mm x 600 mm) en una máquina de colada continua de tres hebras. La velocidad de colada se puede establecer, por ejemplo, en menos de 0,46 m/s. Durante la colada, el acero líquido se protege del oxígeno (aire) mediante una envoltura que implica tubos de cerámica que se extienden desde el fondo del cucharón hacia la artesa (un recipiente de retención que distribuye el acero fundido en los tres moldes a continuación) y el fondo de la artesa en cada molde. El acero líquido puede agitarse electromagnéticamente mientras se encuentra en el molde de colada para mejorar la homogeneización y, por lo tanto, minimizar la segregación de la aleación.

[0029] Después de la colada, los palancones colados se calientan a aproximadamente 1220 °C y se laminan en un palancón "laminado" en una pluralidad (por ejemplo, 15) de pasadas en un laminador de palancones. Los palancones laminados se colocan "calientes" en un horno de recalentamiento y se recalientan a 1220 °C para proporcionar una temperatura uniforme de laminado del riel. Después de la decalaminación, el palancón laminado puede laminarse en el riel en múltiples (por ejemplo, 10) pasadas en un esbastador, desbastador intermedio y una acabadora. La temperatura de acabado es deseablemente de aproximadamente 1040 °C. El riel laminado puede decalaminarse nuevamente a aproximadamente 900 °C para obtener un óxido secundario uniforme en el riel antes del endurecimiento de la cabeza. El riel puede enfriarse con aire a aproximadamente 775 °C-750 °C.

[0030] El riel se somete a un procedimiento de enfriamiento en línea y endurecimiento de la cabeza utilizando un sistema de pulverización de agua. Un aparato de enfriamiento ejemplar se muestra en la figura 3, en la que el aparato de enfriamiento se divide en cuatro secciones independientes. Por ejemplo, el aparato de enfriamiento puede tener 99 o más metros de longitud que tienen más de un centenar de boquillas de pulverización. Las boquillas pueden disponerse para enfriar toda la superficie del riel, incluyendo la parte superior de la cabeza, ambos lados de la cabeza, las esquinas superior e inferior (no numeradas) de la cabeza, la superficie inferior de la cabeza, ambos lados de la banda del riel y la base del riel. (Véase la figura 9). En la figura 3, las flechas verticales designan las ubicaciones de siete pirómetros.

[0031] Según una implementación, el enfriamiento en línea de endurecimiento de la cabeza implica una primera etapa acelerada desde una temperatura inicial en un intervalo de aproximadamente 775 °C-750 °C a una temperatura intermedia en un intervalo de aproximadamente 670 °C-610 °C. Dependiendo de la velocidad de línea y el tamaño del aparato de enfriamiento, las boquillas de pulverización se pueden colocar, por ejemplo, en los primeros 25 metros del aparato de enfriamiento. El caudal de agua puede variar en el aparato de enfriamiento para optimizar la eliminación de calor y desarrollar la microestructura y dureza de perlita adecuada. Generalmente, la primera etapa acelerada se lleva a cabo para mantener la temperatura de la superficie de la cabeza del riel dentro de los límites identificados en la figura 1. Específicamente, si las temperaturas de enfriamiento durante la primera etapa acelerada se trazaban en una gráfica hipotética/imaginaria con coordenadas xy con el eje x que representa el tiempo de enfriamiento en segundos y la temperatura del eje y en Celsius de la superficie de la cabeza del riel de acero, la velocidad de enfriamiento se mantendría en una región entre una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento superior definida por una línea superior que conecta las coordenadas xy (0 s, 775 °C) y (20 s, 670 °C), y una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento inferior definida por una línea inferior que conecta las coordenadas xy (0 s, 750 °C) y (20 s, 610 °C). A modo de ejemplo, la velocidad de enfriamiento media durante la etapa de enfriamiento acelerado puede encontrarse dentro de un intervalo de aproximadamente 5 a aproximadamente 10 °C/s.

[0032] Según esta implementación, el enfriamiento en línea de endurecimiento de la cabeza implica a continuación una segunda etapa gradual desde aproximadamente la temperatura intermedia en el intervalo de 670-610 °C a una temperatura en un intervalo de aproximadamente 550-500 °C, como se ilustra adicionalmente en la gráfica de la figura 1. La temperatura y el caudal del agua pulverizada en el riel de acero durante esta segunda etapa produce una velocidad de enfriamiento media más lenta que la experimentada en la primera etapa acelerada. Generalmente, el enfriamiento en la segunda etapa gradual se lleva a cabo para mantener la temperatura de la superficie de la cabeza del riel dentro de los límites identificados en la gráfica de la figura 1. Específicamente, si las temperaturas durante la segunda etapa gradual se trazaban en la gráfica hipotética/imaginaria descrita anteriormente, la velocidad de enfriamiento se mantendría en una región entre una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento superior definida por una línea superior que conecta las coordenadas xy (20 s, 670 °C) y (110 s, 550 °C), y una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento inferior definida por una línea inferior que conecta las coordenadas xy (20 s, 610 °C) y (110 s, 500 °C). La velocidad de enfriamiento media durante la etapa de enfriamiento acelerado es preferentemente mayor que una velocidad de enfriamiento de aire. Se aplica suficiente flujo de agua en las secciones posteriores del aparato de enfriamiento para permitir que la transformación de perlita continúe y para eliminar el calor generado por la transformación de perlita.

[0033] Durante la primera etapa de enfriamiento según una realización ejemplar, el agua a una temperatura de, por ejemplo, aproximadamente 10 °C a aproximadamente 15 °C se pulveriza en la superficie superior de la cabeza 12, ambas superficies laterales de la cabeza 16 y ambas superficies de banda 20 a un caudal de agua total de aproximadamente 20 a aproximadamente 30 m³/h en la superficie superior de la cabeza, de aproximadamente 20 a aproximadamente 30 m³/h total en ambas superficies laterales de la cabeza y de aproximadamente 10 a aproximadamente 20 m³/h total en ambas superficies de banda. En la realización ilustrada, la primera etapa de enfriamiento puede tener lugar en la primera sección de 25 metros del dispositivo de endurecimiento de la cabeza de 100 metros de largo.

[0034] Durante la segunda etapa de enfriamiento según una realización ejemplar, el agua a una temperatura de aproximadamente 10 °C a aproximadamente 15 °C se pulveriza sobre el riel en tres caudales que disminuyen progresivamente en la superficie superior de la cabeza del riel 12. En la segunda sección de 25 metros del dispositivo de endurecimiento de la cabeza, el flujo de agua se aplica en la superficie superior de la cabeza a un caudal de aproximadamente 25 a aproximadamente 35 m³/h. En la tercera sección de 25 metros, el flujo de agua se aplica en la superficie superior de la cabeza a un caudal de aproximadamente 12 a aproximadamente 18 m³/h. En la cuarta sección de 25 metros, el flujo de agua se aplica en la superficie superior de la cabeza a un caudal de aproximadamente 10 a aproximadamente 15 m³/h. En estas tres secciones se aplica un flujo de agua de aproximadamente 20 a aproximadamente 30 m³/h en ambas superficies de la cabeza lateral y de aproximadamente 10 a aproximadamente 20 m³/h en ambas superficies de banda. La segunda etapa de enfriamiento equilibra gradual y precisamente la extensión de la recalcencia con la formación de una separación interlaminar fina de la perlita. La velocidad de desplazamiento del riel en ambas etapas puede ser, por ejemplo, de aproximadamente 0,65 a aproximadamente 0,85 metros/s.

[0035] Las mediciones de temperatura se toman en la superficie superior de la cabeza del riel que pasa a través del aparato de enfriamiento. Este procedimiento de enfriamiento de doble etapa proporciona una microestructura completamente perlítica sin la formación de redes de cementita proeutectoide continuas perjudiciales que de otro modo tienden a formarse cuando los rieles se enfrían por aire o se enfrían aceleradamente a una velocidad insuficientemente alta. Este procedimiento de enfriamiento de doble etapa proporciona un control preciso de la extracción de calor para evitar que el calor de transformación (recalcencia) permita que la perlita se vuelva más gruesa durante la transformación y produzca menor dureza. EJEMPLOS

[0036] Ensayos de producción: Se produjeron tres muestras a escala completa de composiciones ejemplares en un riel 136RE (136 libras por yarda). A continuación se compara una composición de riel de alta resistencia comparativa convencional (composición comparativa A) procesada el mismo día que las composiciones ejemplares (composiciones inventivas 1, 2 y 3). Las composiciones químicas reales (en porcentajes en peso) se enumeran en la tabla 2 a continuación:

Tabla 2

Composición	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	V	Ti	N
Comp 1	0,92	0,72	0,012	0,008	0,50	0,24	0,08	0,025	0,21	0,006	0,073	0,026	0,0084
Comp 2	0,93	0,74	0,017	0,008	0,58	0,23	0,10	0,028	0,33	0,007	0,074	0,026	0,0075
Comp 3	0,88	0,75	0,009	0,007	0,53	0,23	0,09	0,026	0,28	0,009	0,073	0,032	0,0085
Comp. A	0,82	0,99	0,010	0,010	0,33	0,23	0,10	0,037	0,30	0,008	0,002	0,020	0,0106

[0037] Las composiciones se produjeron en un horno de fusión de arco eléctrico DC de 140 toneladas con temperaturas de grifo de 1610 °C a 1640 °C seguido de tratamiento en un horno de tratamiento de cucharón AC (para adiciones de aleación) y desgasificación de tanque (para eliminar gases disueltos). Las composiciones fueron coladas continuamente en palancones de sección transversal 370 mm x 600 mm, cortados a longitud (~5 m) y recalentados en un horno. Después de calentar a 1220 °C, cada palancon se laminó en un laminador de palancones a una sección transversal de palancon más pequeña de 190 mm x 280 mm y a continuación se cizalló a longitud para proporcionar un único riel. Los palancones laminados se recalentaron a una temperatura de laminación (1230 °C) en un horno de recalentamiento de tipo lote y a continuación se laminaron a un riel de 27 metros de largo (5 pasadas en un desbastador, 3 pasadas en un desbastador intermedio y 2 pasadas en una acabadora). La temperatura después de la pasada de laminación final osciló entre 1000-1050 °C. En todos los ensayos se produjo la sección AREMA 136RE (136 libras por yarda). Justo después de laminar, un extremo del riel se cortó con una sierra caliente y ese extremo de corte del riel entró en la máquina de endurecimiento de la cabeza aproximadamente 8 minutos más tarde a una temperatura de 750-775 °C. La máquina de endurecimiento de la cabeza tenía 99 metros de largo y consistía en 67 módulos de pulverización de agua con cada módulo que tenía 3 boquillas de pulverización de cabeza superior, 4 boquillas de pulverización de cabeza lateral y 4 boquillas de pulverización de banda. También había boquillas de pulverización separadas para los pies. El riel pasó a través de estos conjuntos de boquillas en 120-150 segundos a una velocidad de desplazamiento de 0,65 a 0,85 m/s. El riel salió de la máquina con temperaturas superficiales inferiores a 450 °C. Por lo tanto, el procedimiento se controló por la cantidad de flujo de agua, la temperatura de

entrada y la velocidad del riel como se describió anteriormente. Se montaron pirómetros infrarrojos de longitud de onda única fuera y dentro de la máquina para medir la temperatura de la superficie de la cabeza del riel a distancias de aproximadamente 0, 15, 29, 42, 56, 80 y 102 m del pirómetro de entrada de la máquina (véase la figura 3). Se montó otro pirómetro a aproximadamente 100 m de la salida (aproximadamente 90 segundos después de la salida) para

5 medir la temperatura (el rebote de temperatura que tiene lugar en la cabeza del riel en el aire fuera de la máquina de endurecimiento de la cabeza). Esta temperatura osciló entre aproximadamente 500-560 °C y es una indicación de la cantidad de calor que todavía estaba en la cabeza de la cabeza del riel.

[0038] Propiedades. Una propiedad mecánica importante del riel de ferrocarril es la dureza de la cabeza.

- 10 Cuanto mayor sea la dureza, mejor será la resistencia al desgaste y mayor será la vida útil del riel en uso como vía. La figura 2 muestra la dureza (escala C de Rockwell) de los rieles endurecidos en la cabeza producidos a partir de las composiciones inventivas 1 y 2. La composición inventiva 3 de la tabla 2, no trazada, siguió la misma tendencia que las composiciones inventivas 1 y 2. La dureza se midió a lo largo de la línea central de la cabeza del riel comenzando en la posición 1, una profundidad de 3,175 mm (1/8") desde la superficie superior, y en puntos de medición adicionales
- 15 progresando en incrementos de profundidad de 3,175 mm (1/8") al centro a 25,4 mm (1") de profundidad en la cabeza del riel.

[0039] Los rieles de acero endurecidos en la cabeza de las composiciones ejemplares tienen mayor dureza que el riel de acero endurecido en la cabeza de la composición comparativa convencional. También se observa en la

20 figura 2 que los perfiles de dureza de las composiciones inventivas ejemplares 1 y 2 y la composición comparativa A son claramente diferentes en que las composiciones de acero ejemplares tienen alta dureza en la superficie que disminuye gradualmente con la profundidad dentro de la cabeza del riel, mientras que la composición de acero comparativa convencional tiene baja dureza en la superficie que aumenta gradualmente con la profundidad y a continuación disminuye. Se cree que el perfil de dureza subsuperficial del acero convencional se atribuye a la pérdida

25 de carbono de la superficie debido al procedimiento de descarburación. Esto se produce en la práctica de calentamiento empleada para fabricar el riel. Debido a que el acero convencional se encuentra en o cerca del contenido de carbono eutectoide, cualquier pérdida de carbono desplazará las capas superficiales del riel a una composición hipoeutectoide. En una composición hipoeutectoide, la ferrita proeutectoide se forma en los límites de grano de austenita anteriores durante el enfriamiento. Por lo tanto, la microestructura está compuesta por ferrita en la superficie

30 y redes de ferrita en los límites de grano austenítico que se extienden hacia el interior desde la superficie. Esto se ve típicamente mediante el examen microestructural de los aceros ferroviarios convencionales AREMA. La fase de ferrita es más blanda que la perlita y, por lo tanto, la dureza en la superficie es inferior a la dureza en el interior de la cabeza del riel. Esto explica el perfil de dureza del acero convencional que se muestra en la figura 2.

- 35 **[0040]** En marcado contraste, las composiciones inventivas 1 y 2 proporcionaron acero de composición hipereutectoide (específicamente aproximadamente 0,10 % de C más alto que el acero convencional) y la pérdida de carbono en la superficie de la descarburación no cambió las capas superficiales por debajo del punto eutectoide. Por lo tanto, las capas superficiales de la cabeza del riel seguían siendo hipereutectoides y había una ausencia completa de ferrita blanda. Esto explica el perfil de dureza de las composiciones de acero ejemplares. Con el fin de determinar
- 40 el contenido real de carbono en el punto eutectoide para el acero incorporado, el modelado se realizó utilizando el software ThermoCalc (TCW). (www.thermocalc.com). El modelo muestra una porción del diagrama hierro-carbono según lo influenciado por los elementos de aleación añadidos deliberadamente a las muestras de acero ejemplares. El resultado se muestra para la composición inventiva 2 (tabla 2) donde se puede observar que el punto eutectoide está en 0,679 % en peso de C, muy por debajo del contenido real de carbono de 0,94 % en peso de C.

- 45 **[0041]** Las composiciones inventivas 1 y 2 y la composición comparativa A se sometieron a procedimientos similares de calentamiento y enfriamiento (endurecimiento de la cabeza). Como se muestra en la figura 2, las muestras de acero de las composiciones inventivas 1 y 2 tienen mayor dureza en todas las profundidades en comparación con el acero convencional de la composición comparativa A. Sin querer limitarse a ninguna teoría, se cree que el aumento
- 50 de la resistencia mejorada es atribuible a (a) una fracción de volumen mayor de cementita del nivel de carbono más alto, (b) el fortalecimiento de la solución sólida del silicio agregado y (c) el fortalecimiento por precipitación de la ferrita en la perlita laminar mediante la adición de vanadio.

[0042] Las etapas de enfriamiento acelerado para los ejemplos anteriores se describirán ahora con más detalle.

- 55 En el caso de la composición Inventiva 2, se cortó un riel con la sierra caliente para proporcionar una muestra de control (ejemplo de riel comparativo A en la tabla 3 a continuación) en una condición enfriada por aire. El riel restante (ejemplo de riel inventivo 1 en la tabla 3 a continuación) se endureció en la cabeza según una realización de la invención. Se comparan las mediciones de dureza de Rockwell C tomadas a incrementos de profundidad de 3,175 mm (1/8") a lo largo de la línea central desde la superficie superior de la cabeza del riel.

60

Tabla 3

Dureza HRC								
	Dureza medida a diferentes profundidades de la superficie superior de la cabeza							
Ejemplo de riel (mm)	3,175	6,35	9,525	12,7	15,875	19,05	22,225	25,4
Ej. de riel comp. A (enfriado por aire)	34,9	34,1	33,7	34,6	34,9	34,6	35,0	33,4
Ej de riel 1 (endurecido en la cabeza)	41,1	41,2	41,0	41,0	41,0	39,2	40,0	38,0

[0043] Las propiedades de tracción se comparan en la tabla 4 a continuación:

5

Tabla 4

Ejemplo de riel	Límite elástico (ksi)	Resistencia a la tracción (ksi)	% de alargamiento total (2")
Ej. de riel comp. A: enfriado por aire	98	169	8,1
Ej de riel inventivo 1: endurecido en la cabeza	135	198	10,0

[0044] Los datos anteriores de la tabla 4 demuestran que el enfriamiento acelerado contribuye a lograr propiedades de dureza mejoradas en comparación con un ejemplo comparativo enfriado por aire.

- 10 **[0045]** El riel entra en la máquina de endurecimiento de la cabeza a una temperatura específica (T_e = temperatura de entrada) y pasa a través de cuatro secciones independientes de pulverización de agua de 25 metros de largo cada una (véase la figura 3). La configuración de la boquilla de pulverización y los caudales de agua son diferentes en cada sección. La temperatura de la superficie superior de la cabeza del riel se midió a la entrada de la máquina, a mitad de camino en cada sección y al final de cada sección. (Véase la figura 3). La temperatura también
15 se midió aproximadamente 90 segundos (en aire) después de que el riel salió de la máquina.

- [0046]** La figura 4 muestra una gráfica de las mediciones del pirómetro para el riel del ejemplo de riel inventivo 2, que se preparó a partir de la composición inventiva 1. El resultado es una curva de enfriamiento real del riel que muestra una velocidad de enfriamiento inicial de 7,3 °C/segundo al comienzo del endurecimiento de la cabeza seguida
20 de una desaceleración en el enfriamiento causada por el calor generado por la transformación de perlita y el control específico de los volúmenes de enfriamiento de agua. Si el acero del riel tiene demasiado contenido de aleación o un equilibrio incorrecto de los elementos de aleación, la reacción de perlita podría no producirse durante la primera etapa de enfriamiento acelerado, la temperatura de la cabeza del riel seguiría disminuyendo bajo la influencia de los pulverizadores de agua, y se formaría bainita. Esto se ilustra en la figura 5 para un simple acero 0,80 % de C AISI
25 1080. La velocidad de enfriamiento acelerado inicial reduce la temperatura del riel hasta el área de la "nariz" del diagrama tiempo-temperatura-transformación. El calor de transformación de la transformación de la austenita a la perlita ralentiza el enfriamiento y el riel se transforma a través de la nariz a la curva Ps (temperatura de inicio de la perlita) y desarrolla una microestructura completamente perlítica a medida que pasa la curva Pf (temperatura de acabado de la perlita). Por lo tanto, una alta velocidad de enfriamiento inicial es importante, pero debe controlarse
30 mediante las condiciones de enfriamiento adecuadas en la máquina de endurecimiento de la cabeza y coincidir con la composición del riel.

- [0047]** Ejemplo de riel inventivo 3 (enfriamiento dentro de los límites superior/inferior). La figura 6A es una gráfica de un procedimiento de enfriamiento de endurecimiento de la cabeza llevado a cabo según el procedimiento
35 de enfriamiento de dos etapas descrito anteriormente en la composición inventiva 1. El endurecimiento de la cabeza se llevó a cabo a una velocidad de enfriamiento que, si se traza en una gráfica con coordenadas xy con el eje x que representa el tiempo de enfriamiento en segundos y el eje y que representa la temperatura en Celsius de la superficie de la cabeza del riel de acero, se mantiene en una región entre una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento superior definida por una línea superior que conecta las coordenadas xy (0 s, 775 °C), (20 s, 670 °C) y (110 s, 550 °C)
40 y una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento inferior definida por una línea inferior que conecta las coordenadas xy (0 s, 750 °C), (20 s, 610 °C) y (110 s, 500 °C). La figura 6B indica las lecturas de dureza de la cabeza medidas tomadas en la línea central en la cabeza del riel de acero resultante. La cabeza del riel de acero tenía valores de dureza Brinell en un intervalo de 376-397 HB a lo largo de un intervalo de profundidad de 3,175 mm (es decir, una medición superficial) a 25 mm (es decir, una medición central). La cabeza del riel de acero también tenía una dureza
45 Brinell de al menos 380 HB a una profundidad de 3/8" (aproximadamente 9,5 mm) desde cada punto en la superficie de la cabeza del riel de acero.

[0048] Ejemplos de riel comparativos B y C (enfriamiento fuera de los límites superior/inferior). Las figuras 7A y 8A son gráficas de un procedimiento de enfriamiento de endurecimiento de la cabeza llevado a cabo según los

ejemplos de riel comparativos B y C. Los rieles de los ejemplos de riel comparativos B y C se prepararon a partir de las composiciones inventivas 2 y 3, respectivamente. El endurecimiento de la cabeza se llevó a cabo a una velocidad de enfriamiento que, si se trazaba en una gráfica con coordenadas xy con el eje x que representa el tiempo de enfriamiento en segundos y el eje y que representa la temperatura en Celsius de la superficie de la cabeza del riel de acero, no se mantenía en una región entre una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento superior definida por una línea superior que conecta las coordenadas xy (0 s, 775 °C), (20 s, 670 °C) y (110 s, 550 °C) y una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento inferior definida por una línea inferior que conecta las coordenadas xy (0 s, 750 °C), (20 s, 610 °C) y (110 s, 500 °C). En el ejemplo de riel comparativo B (figura 7A), la velocidad de enfriamiento en la segunda etapa cayó por debajo de la gráfica de límite de velocidad de enfriamiento inferior alrededor de t=25-45 seg. En el ejemplo de riel comparativo C (figura 8A), la velocidad de enfriamiento en la segunda etapa aumentó por encima de la gráfica de límite de velocidad de enfriamiento superior alrededor de t=72-100 seg.

[0049] La cabeza del riel de acero resultante del ejemplo de riel comparativo B (figura 7B) tenía una distribución de dureza de línea central en el intervalo de 392 a 415 HB. Sin embargo, se encontraron regiones de bainita en las regiones de mayor dureza de la cabeza de riel, lo que significa que cuando el enfriamiento se extiende por debajo del límite inferior, existe un peligro de formación de bainita en la cabeza del riel.

[0050] La cabeza del riel de acero del ejemplo de riel comparativo C (figura 8B) también tenía una distribución de dureza de línea central en el intervalo de 360 a 394 HB. El nivel de dureza cerca del centro de la cabeza del riel estaba por debajo de la especificación mínima de AREMA de 370 HB, lo que significa que cuando el enfriamiento se extiende por encima del límite superior, la dureza no cumplió con la dureza mínima esperada de AREMA de 370 HB.

[0051] A menos que se indique lo contrario, todos los porcentajes mencionados en esta invención son en peso.

[0052] La descripción detallada que antecede de determinadas realizaciones ejemplares de la invención se ha proporcionado con el fin de explicar los principios de la invención y su aplicación práctica, permitiendo así que otros expertos en la materia entiendan la invención para diversas realizaciones y con diversas modificaciones que sean adecuadas para el uso particular contemplado. Esta descripción no pretende ser exhaustiva ni limitar la invención a las realizaciones precisas descritas. Aunque solo unas pocas realizaciones se han descrito en detalle anteriormente, otras realizaciones son posibles y los inventores pretenden que estas estén comprendidas dentro de esta memoria descriptiva y el alcance de las reivindicaciones adjuntas. La memoria descriptiva describe ejemplos específicos para lograr un objetivo más general que puede lograrse de otra manera. Las modificaciones y equivalentes serán evidentes para los expertos en esta técnica que hagan referencia a esta memoria descriptiva, y están comprendidas dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas. Se pretende que esta descripción sea un ejemplo, y las reivindicaciones pretenden abarcar cualquier modificación o alternativa que pueda ser predecible para un experto en la materia.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de fabricación de un riel de acero hipereutectoide endurecido en la cabeza que comprende endurecer la cabeza de un riel de acero que tiene una composición que comprende 0,86-1,00 % en peso de carbono, 0,40-0,75% en peso de manganeso, 0,40-1,00 % en peso de silicio, 0,20-0,30 % en peso de cromo, 0,05-0,15 % en peso de vanadio, 0,015-0,030 % en peso de titanio, y por encima del 0,0050 % en peso de nitrógeno, que es típicamente suficiente nitrógeno para reaccionar con el titanio para formar nitruro de titanio, dicho endurecimiento de la cabeza se lleva a cabo a una velocidad de enfriamiento que, si se traza en una gráfica con coordenadas xy con el eje x que representa el tiempo de enfriamiento en segundos y el eje y que representa la temperatura en grados Celsius de la superficie de la cabeza del riel de acero, se mantiene en una región entre una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento superior definida por una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento superior que conecta las coordenadas xy (0 s, 775 °C), (20 s, 670 °C) y (110 s, 550 °C) y una gráfica de límite de velocidad de enfriamiento inferior definida por una línea que conecta las coordenadas xy (0 s, 750 °C), (20 s, 610 °C) y (110 s, 500 °C).
2. El procedimiento de la reivindicación 1, donde la velocidad de enfriamiento de 0 segundos a 20 segundos si se traza en la gráfica tiene un promedio dentro de un intervalo de 5-10 °C/s, y donde la velocidad de enfriamiento de 20 segundos a 110 segundos si se traza en la gráfica es mayor que una velocidad de enfriamiento de aire comparable.
3. El procedimiento de la reivindicación 1 o 2, donde la composición del riel de acero comprende opcionalmente aluminio, comprendiendo el procedimiento además formar el riel de acero a una temperatura de aproximadamente 1600 °C a aproximadamente 1650 °C mediante la adición secuencial del manganeso, silicio, carbono y opcionalmente aluminio, seguido de titanio y vanadio en cualquier orden o en combinación.
4. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, donde el nitrógeno está presente en la composición en una cantidad de 0,0050 a 0,0150 % en peso.
5. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, donde el riel de acero tiene una porción de cabeza que tiene una microestructura completamente perlítica.
6. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, donde la composición del riel de acero tiene 0,90-1,00 % en peso de carbono.
7. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, donde la composición del riel de acero tiene más de 0,0050 % en peso de nitrógeno.
8. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, donde la cabeza del riel de acero tiene una dureza Brinell de al menos 380 HB a una profundidad de 10 mm desde cada punto de la superficie de la cabeza del riel de acero.
9. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, donde la cabeza del riel de acero tiene una dureza Brinell de al menos 370 HB a una profundidad de 25 mm desde un punto de la superficie central de la cabeza del riel de acero.
10. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, donde la cabeza del riel de acero tiene valores de dureza Brinell en un intervalo de 370-410 HB a lo largo de un intervalo de profundidad de 0-25 mm desde cada punto de la línea central vertical de la superficie de rodadura de la cabeza del riel de acero.
11. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, donde dicho endurecimiento de la cabeza comprende pulverizar agua sobre el riel de acero.
12. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, donde dicho endurecimiento de la cabeza comprende pulverizar agua directamente en una parte superior, lateral, esquinas inferiores y superficie inferior de la cabeza del riel de acero, en ambos lados de una banda del riel de acero y en una base del riel de acero.
13. El procedimiento de la reivindicación 11 o 12, donde el agua pulverizada durante una etapa inicial del endurecimiento de la cabeza tiene una temperatura de 10 °C a 15 °C.
14. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, que comprende además mover el riel de acero a una velocidad de desplazamiento de 0,65 m/s a 0,85 m/s durante dicha pulverización.

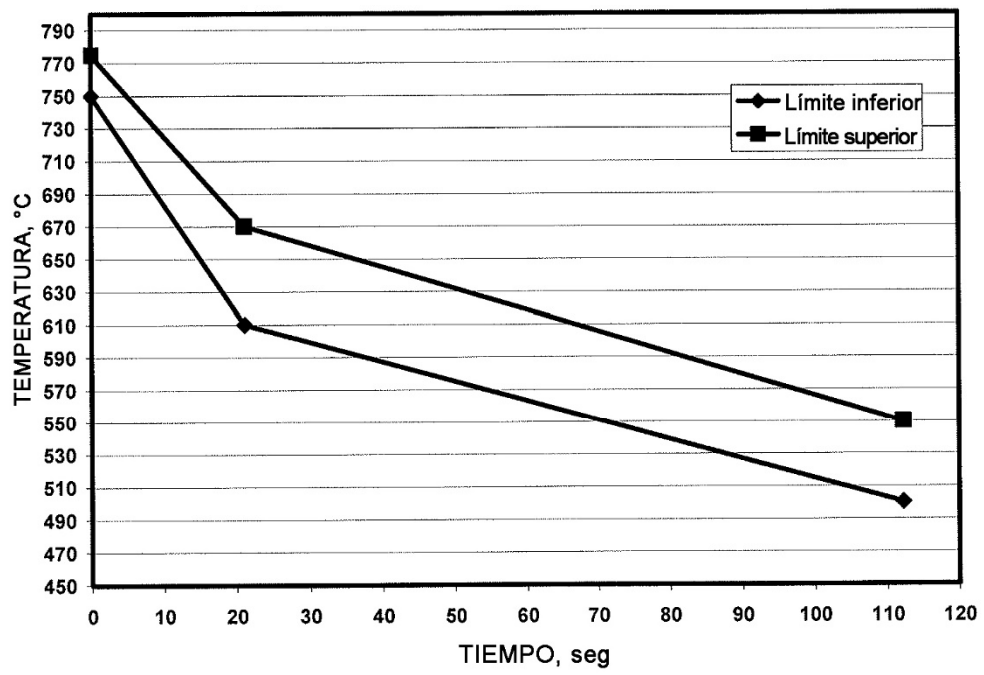


Fig. 1

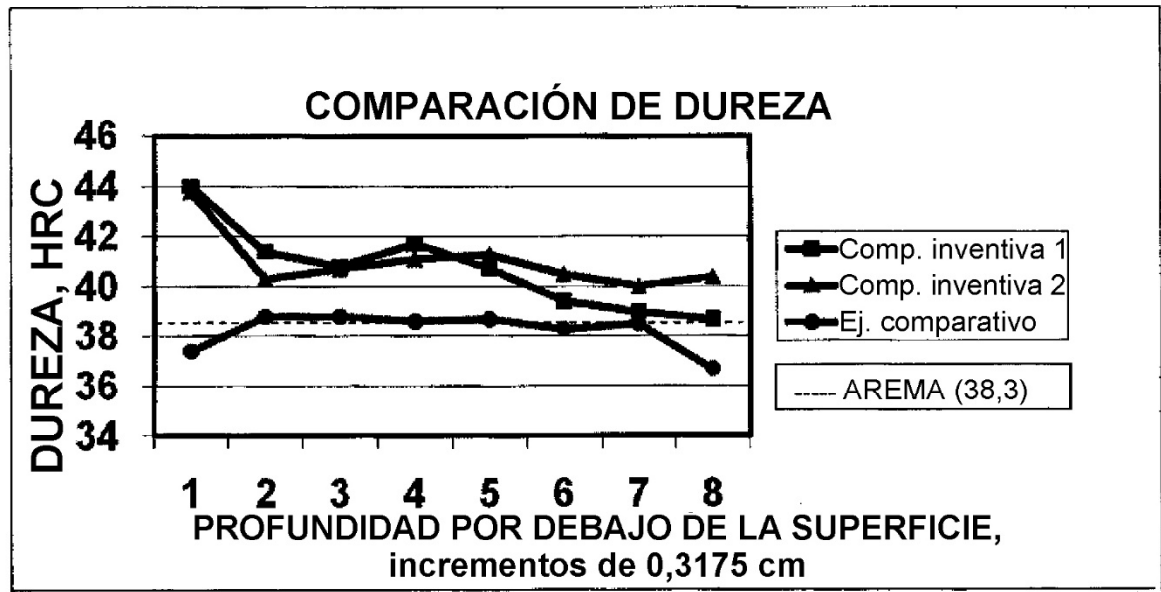


Fig. 2

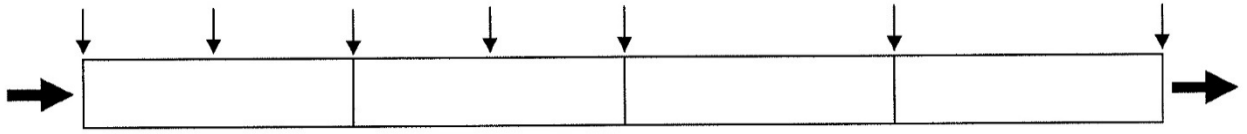


Fig. 3

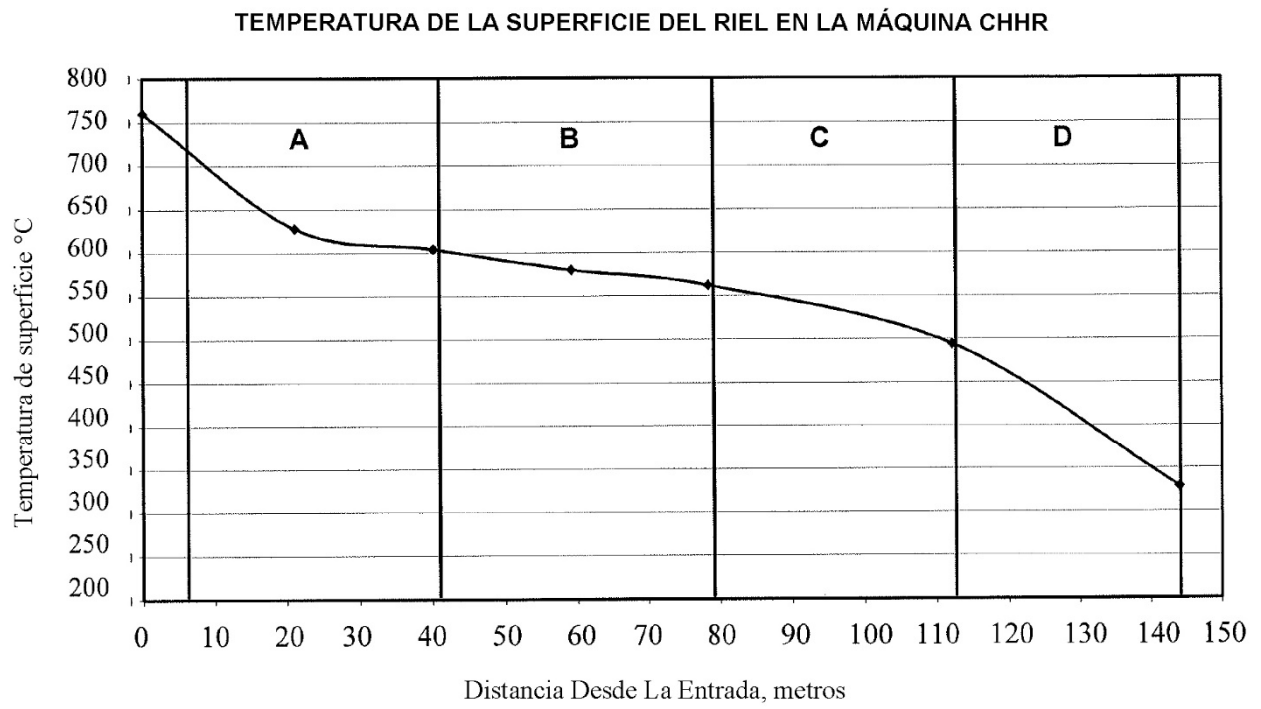


Fig. 4

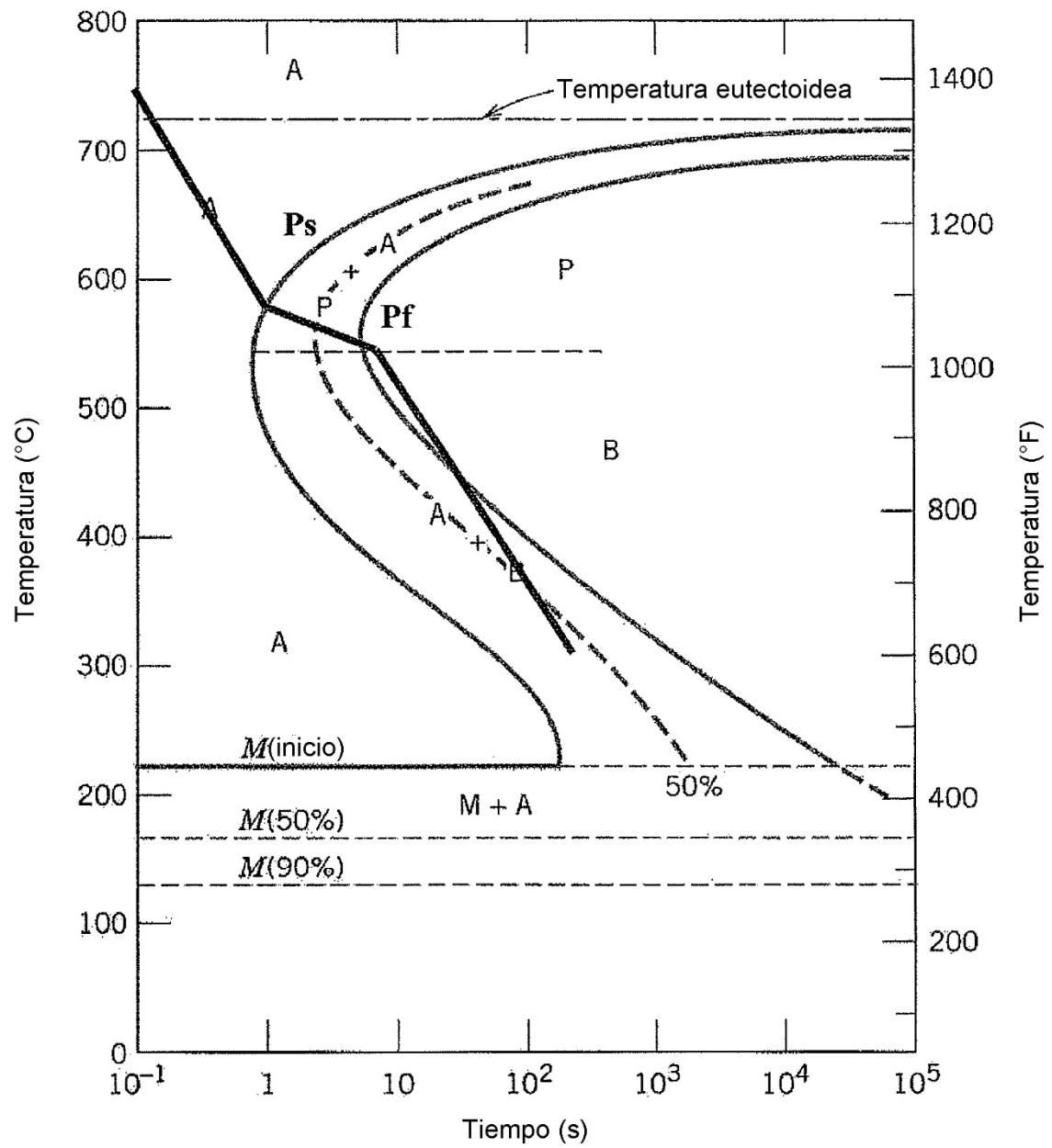


Fig. 5

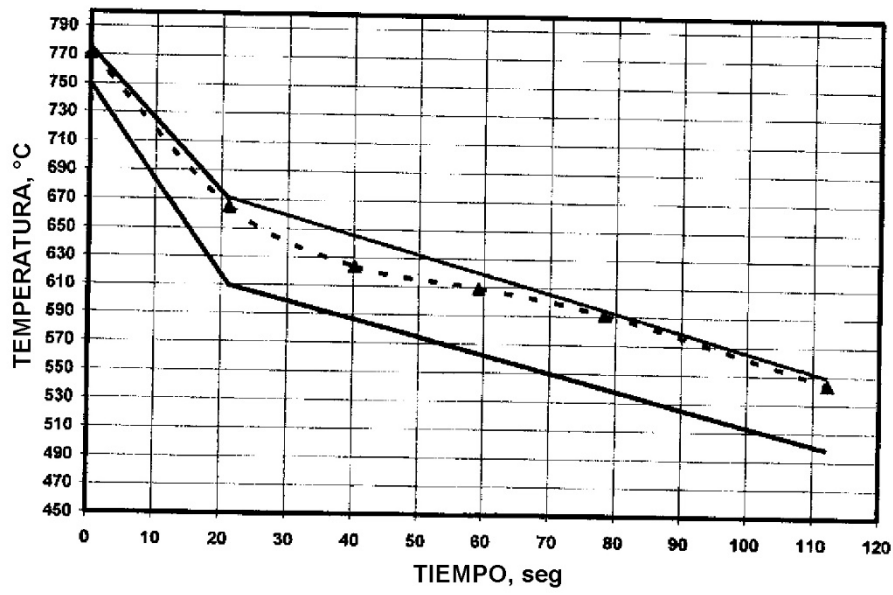


Fig. 6A

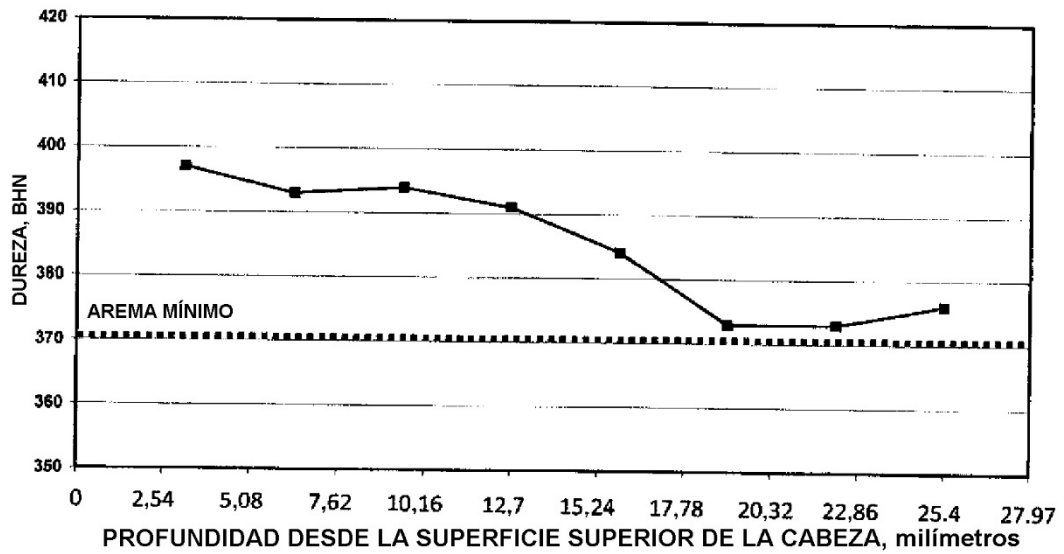


Fig. 6B

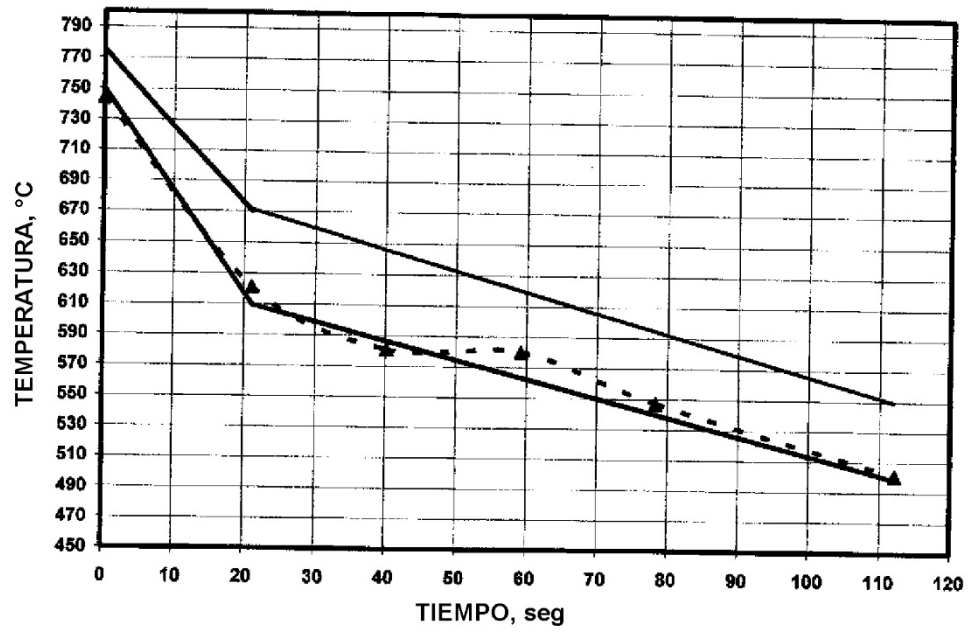


Fig. 7A

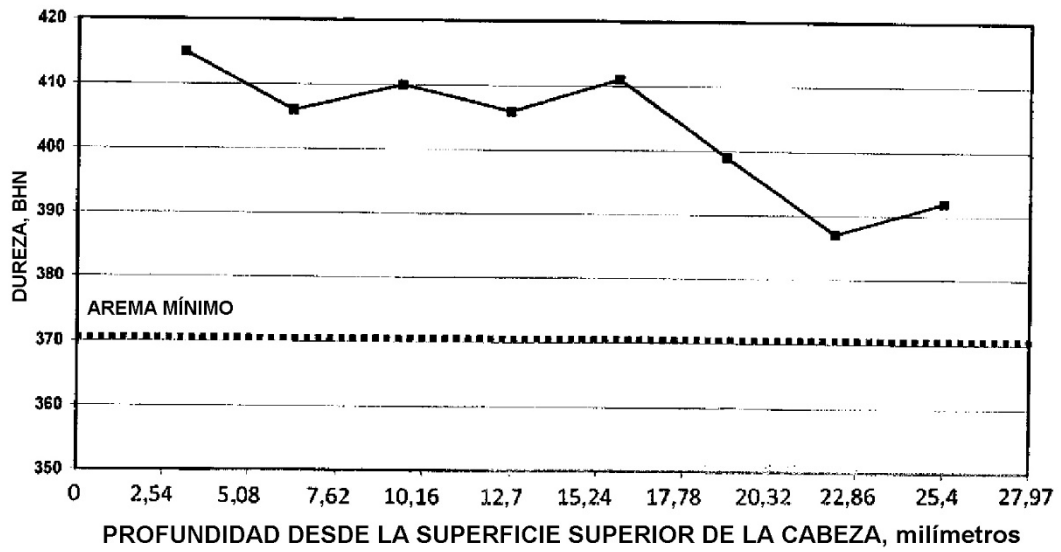


Fig. 7B

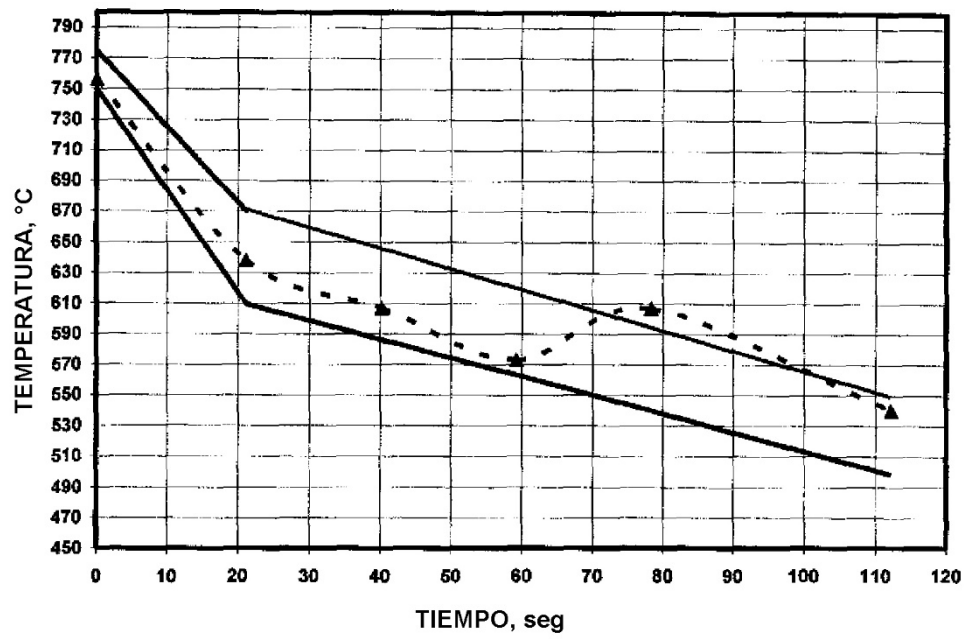


Fig. 8A

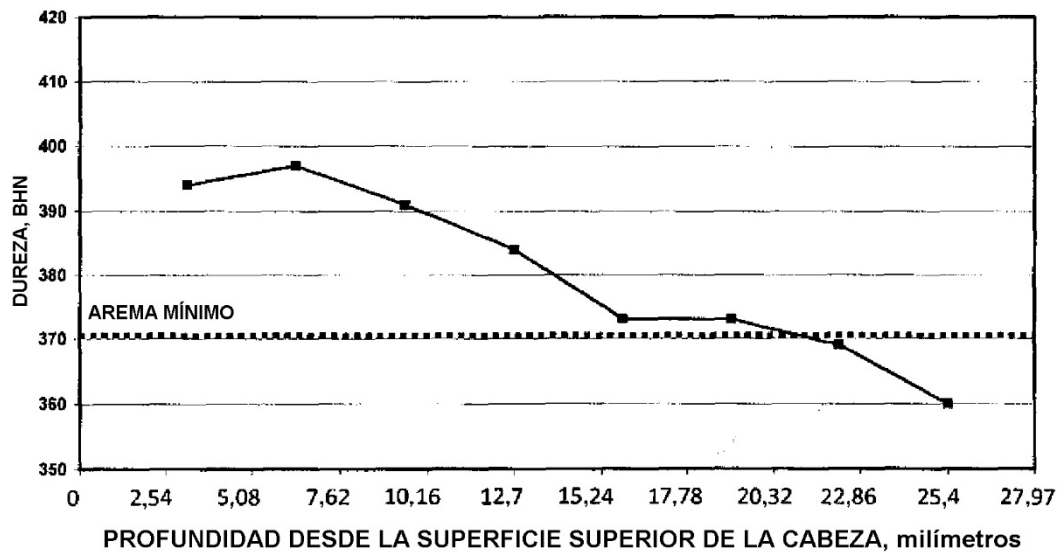


Fig. 8B

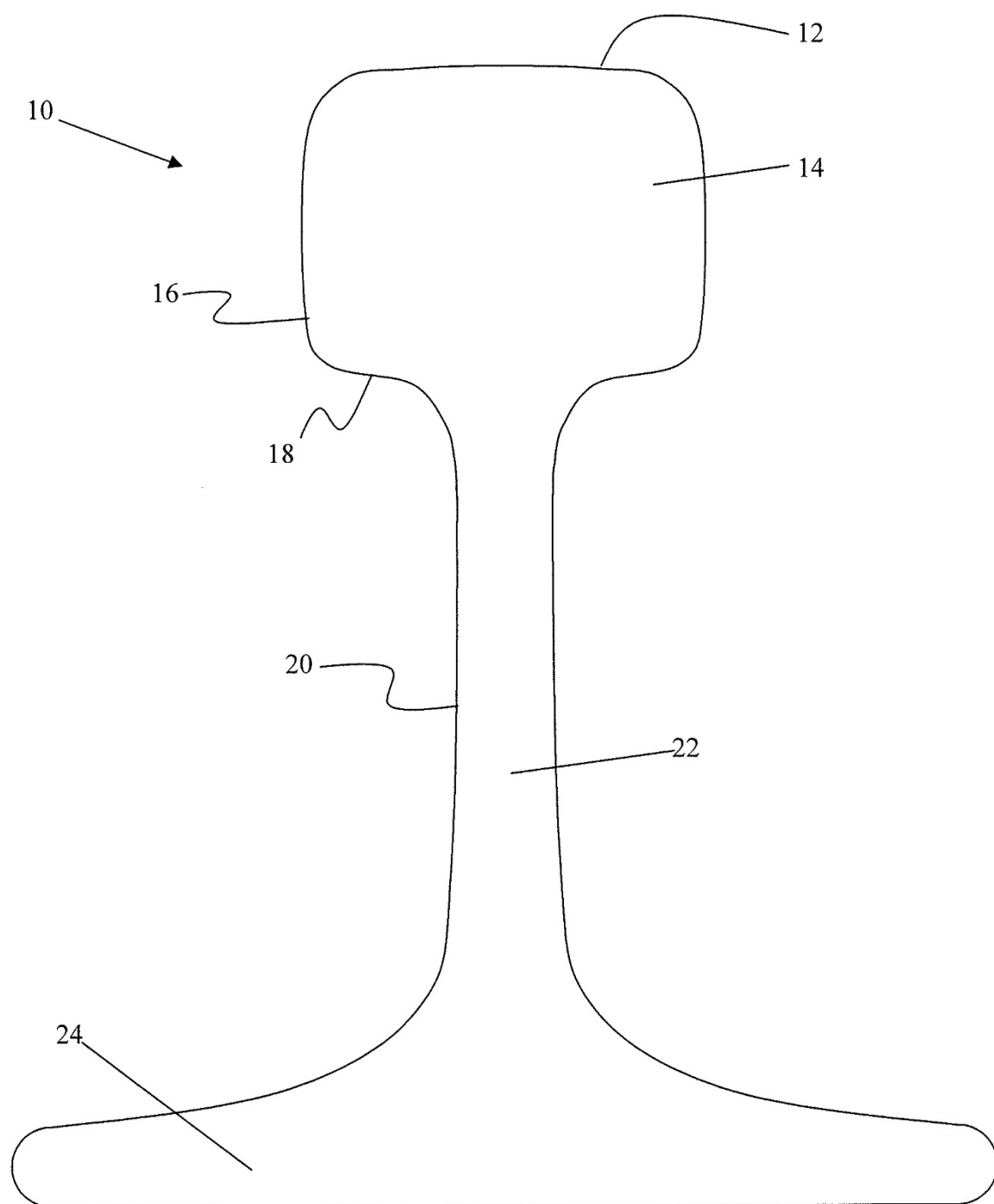


Fig. 9