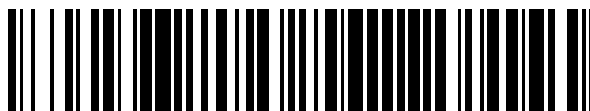


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 656 207**

51 Int. Cl.:

C22C 19/05 (2006.01)

C22F 1/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **07.05.2012 E 15203257 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.10.2017 EP 3045552**

54 Título: **Procesamiento termomecánico de aleaciones a base de níquel**

30 Prioridad:

01.06.2011 US 201113150494

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

26.02.2018

73 Titular/es:

**ATI PROPERTIES LLC (100.0%)
1600 N.E. Old Salem Road
Albany OR 97321 , US**

72 Inventor/es:

**FORBES JONES, ROBIN M y
ROCK, CHRISTOPHER A**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 656 207 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

Procesamiento termomecánico de aleaciones a base de níquel

5 **Campo técnico**

Esta divulgación se refiere al procesamiento termomecánico de aleaciones a base de níquel.

10 **Antecedentes**

Las aleaciones a base de níquel son excelentes aleaciones de ingeniería en varias aplicaciones porque las aleaciones poseen una serie de ventajosas propiedades del material. Por ejemplo, las aleaciones a base de níquel que comprenden adiciones de cromo y hierro tienen excelente resistencia a la corrosión en muchos medios acuosos y atmósferas a alta temperatura. Las aleaciones a base de níquel mantienen también estabilidad metalúrgica y alta resistencia en un amplio intervalo de temperaturas elevadas, y no forman fases fragilizantes durante la exposición a largo plazo a temperaturas elevadas. La combinación de buena resistencia a la fluencia y a la rotura, estabilidad metalúrgica, y resistencia a la corrosión a altas temperaturas y durante largos períodos de servicio permite a las aleaciones a base de níquel funcionar en aplicaciones que implican entornos agresivos y en condiciones de funcionamiento severas. Por ejemplo, las aleaciones a base de níquel pueden encontrar utilidad en aplicaciones de ingeniería que incluyen: producción y equipo de procesamiento de ácidos minerales; unidades de gasificación de carbón; equipo de procesamiento petroquímico; incineradores; tubos de generadores de vapor, placas deflectoras, placas de tubos, y otros equipos; y componentes estructurales en los sistemas de generación de energía de un reactor nuclear.

El documento JP 2009 299120A describe un método para fabricar un material de aleación de sistema ternario Ni-Cr-Fe que tiene un tamaño de grano de cristal pequeño y también con una excelente resistencia SCC. El método incluye una etapa de forjar en caliente el material con una composición predeterminada; una etapa de tratamiento de precalentamiento de calentar el material para mantener la temperatura de la superficie del material sometido a la etapa de forjado en caliente durante el tiempo de 1 hora a 3 horas a la temperatura de pretratamiento de 800 °C a 900 °C; y una etapa de tratamiento de calor de solución sólida para elevar la temperatura de superficie del material calentado en la etapa de tratamiento de calor caliente desde la temperatura de tratamiento de calor y mantener el material durante el tiempo de 1 hora a 6 horas a 1050 °C a 1100 °C.

30 **Sumario**

La invención proporciona un proceso de acuerdo con la reivindicación 1 de las reivindicaciones adjuntas. Un proceso de tratamiento termomecánico para aleaciones a base de níquel comprende al menos dos etapas de calentamiento y al menos dos etapas de trabajo. Una pieza de trabajo de aleación a base de níquel se calienta en una primera etapa de calentamiento a una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel. La pieza de trabajo de aleación a base de níquel calentada se trabaja en una primera etapa de trabajo a una reducción en área del 20 % al 70 % para proporcionar una pieza de trabajo de aleación a base de níquel trabajada. La pieza de trabajo de aleación a base de níquel está a una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ cuando la primera etapa de trabajo comienza. La pieza de trabajo de aleación a base de níquel trabajada se calienta en una segunda etapa de calentamiento a una temperatura mayor que 1700 °F (926 °C) y menor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel. La pieza de trabajo de aleación a base de níquel trabajada se mantiene a temperatura elevada y no se puede enfriar a temperatura ambiente entre el fin de la primera etapa de trabajo y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento. La pieza de trabajo de aleación a base de níquel calentada se trabaja en una segunda etapa de trabajo a una reducción en área de 20 % a 70 %. La pieza de trabajo de aleación a base de níquel está a una temperatura mayor que 1700 °F (927 °C) y menor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel cuando comienza la segunda etapa de trabajo.

En otra realización descrita, un proceso de tratamiento termomecánico para aleaciones a base de níquel, comprende, al menos, dos etapas de calentamiento y al menos dos etapas de forja. Una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel es calentada en una primera etapa de calentamiento a una temperatura en el intervalo de 2000 °F a 2125 °F (de 1093 °C a 1163 °C). La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada se somete a forja rotativa en una primera etapa de forja para una reducción en área del 30 % al 70 % para proporcionar una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel forjada. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada está a una temperatura en el intervalo de 2000 °F a 2125 °F (de 1093 °C a 1163 °C) cuando comienza la primera etapa de forja. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel forjada es calentada en una segunda etapa de calentamiento a una temperatura en el intervalo de 1750 °F a 1925 °F (de 954 °C a 1052 °C). La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel forjada se mantiene a temperatura elevada y no se deja enfriar hasta la temperatura ambiente entre la finalización de la primera etapa de forja y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada se somete a forja rotativa en una segunda etapa de forja para una reducción en área del 20 % al 70 %. El lingote de la aleación a base de níquel calentado está a una temperatura en el intervalo de 1750 °F a 1925 °F (de 954 °C a 1052 °C) cuando comienza la segunda etapa de forja rotativa.

Se entiende que la invención divulgada y descrita en esta memoria descriptiva no se limita a las realizaciones resumidas en este Sumario.

Breve descripción de los dibujos

5 Varias funciones y características de las realizaciones no limitantes y no exhaustivas divulgadas y descritas en esta memoria descriptiva pueden entenderse mejor por referencia a las figuras que se adjuntan, en las que:

10 las Figuras 1A y 1B son diagramas esquemáticos en sección transversal de una operación de forja rotativa;

la Figura 2A es un diagrama esquemático en sección transversal y la Figura 2B es un diagrama esquemático en perspectiva de un producto largo forjado en caliente y tratado con calor que tiene una zona con forma de anillo del anormal crecimiento del grano; y

15 las Figuras 3A a 3D son metalografías de la macroestructura en sección transversal de zonas de productos largos de Aleación 690 que muestran varios efectos del procesamiento termomecánico de acuerdo con varias realizaciones no limitantes descritas en el presente documento.

20 El lector agradecerá los detalles que anteceden, así como otros, después de considerar la siguiente descripción detallada de varias realizaciones no limitantes y no exhaustivas de acuerdo con la presente divulgación.

Descripción

25 En esta memoria descriptiva se describen e ilustran varias realizaciones para proporcionar una comprensión global de la estructura, función, funcionamiento, fabricación y uso de los procesos y productos divulgados. Se entiende que las diversas realizaciones descritas e ilustradas en esta memoria descriptiva no son limitantes ni exhaustivas. Así, la invención no se limita por la descripción de las diversas realizaciones no limitantes y no exhaustivas divulgadas en esta memoria descriptiva. En cambio, la invención se define solo por las reivindicaciones. Los elementos y características ilustrados y/o descritos en relación con diversas realizaciones pueden combinarse con los elementos y características de otras realizaciones. Tales modificaciones y variaciones pretenden incluirse dentro del alcance de esta memoria descriptiva. Como tal, las reivindicaciones pueden modificarse para citar cualquier elemento o característica expresamente o inherentemente descrito en, o de lo contrario expresa o inherentemente soportado por, esta memoria descriptiva.

35 La referencia a través de esta memoria descriptiva a "diversas realizaciones no limitantes", o similares, significa que un elemento o característica particular puede incluirse en una realización. Así, el uso de la frase "en diversas realizaciones no limitantes", o similares, en esta memoria descriptiva no se refiere necesariamente a una realización común, y puede referirse a diferentes realizaciones. Además, los elementos o características particulares pueden combinarse en cualquier manera adecuada en una o más realizaciones. Así, los elementos o características particulares ilustrados o descritos en relación con diversas realizaciones pueden combinarse, en todo o en parte, con los elementos o características de una o más de otras realizaciones sin limitación. Tales modificaciones y variaciones pretenden incluirse dentro del alcance de la presente memoria descriptiva.

45 También, se pretende que cualquier intervalo numérico citado en esta memoria descriptiva incluya todos los subintervalos de la misma precisión numérica incluidos en el intervalo citado. Por ejemplo, se pretende que un intervalo de "1,0 a 10,0" incluya todos los subintervalos entre el valor mínimo citado de 1,0 y el valor máximo citado de 10,0 (ambos incluidos), es decir, que tenga un valor mínimo igual o mayor que 1,0 y un valor máximo igual o menor que 10,0, tal como, por ejemplo, 2,4 a 7,6. Se pretende que cualquier limitación numérica máxima citada en esta memoria descriptiva incluya todas las limitaciones numéricas menores subsumidas en la misma y se pretende que cualquier limitación numérica mínima citada en esta memoria descriptiva incluya todas las limitaciones numéricas mayores subsumidas en la misma.

55 Los artículos gramaticales "uno", "un", "una", y "el", como se usan en esta memoria descriptiva, se pretende que incluyan "al menos uno" o "uno o más", a menos que se indique lo contrario. Por ello, los artículos se utilizan en esta memoria para referirse a uno o más de uno (es decir, a "al menos uno") de los objetos gramaticales del artículo. A modo de ejemplo, "un componente" significa uno o más componentes, y por ello, posiblemente, más de un componente se contempla y puede emplearse o utilizarse en una aplicación de las realizaciones descritas. Además, el uso de un nombre en singular incluye el plural, y el uso de un nombre en plural incluye el singular, a menos que el contexto del uso requiera lo contrario.

60 Las diversas realizaciones divulgadas y descritas en esta memoria descriptiva se refieren al procesamiento termomecánico de aleaciones a base de níquel. El procesamiento termomecánico divulgado y descrito en esta memoria descriptiva puede utilizarse para producir productos de la aleación a base de níquel, tal como, por ejemplo, barras, varillas, planchas, anillos, tiras, placas y similares. Los productos producidos por los procesos descritos en esta memoria descriptiva se pueden caracterizar por un tamaño de grano definido y una distribución definida del carburo precipitado.

El agrietamiento por corrosión intergranular bajo tensiones (IGSCC) es un mecanismo de corrosión en el que se forman grietas a lo largo de los bordes de los granos de un material metálico bajo tensión por tracción y expuesto a un entorno corrosivo. Las tensiones por tracción que fomentan el IGSCC pueden estar en forma de tensiones aplicadas externamente a un componente metálico en servicio y/o en forma de tensiones residuales internas en el material metálico. El IGSCC se encuentra a menudo en aplicaciones que implican entornos agresivamente corrosivos, tal como, por ejemplo, componentes estructurales en equipos de procesamiento químico y en reactores de agua a presión (PWR) para la generación de energía nuclear. Aleaciones a base de níquel, tal como, por ejemplo, la Aleación 600 (UNS N06600) y la Aleación 690 (UNS N06690), se pueden utilizar en tales aplicaciones debido a la resistencia general a la corrosión de tales aleaciones. Sin embargo, las aleaciones a base de níquel pueden, sin embargo, mostrar IGSCC en condiciones de servicio de alta temperatura y alta presión, por ejemplo, en entornos acuosos o de vapor.

Ciertos procesos de tratamiento termomecánico se pueden utilizar para reducir la susceptibilidad de las aleaciones a base de níquel al IGSCC en entornos agresivamente corrosivos. Las combinaciones del trabajo en caliente y de los tratamientos con calor se pueden utilizar para producir productos de la aleación a base de níquel que tienen tamaños de grano y distribuciones del carburo definidos que aumentan la resistencia al IGSCC. Por ejemplo, las aleaciones a base de níquel que incluyen niveles relativamente altos de cromo y hierro, tal como, por ejemplo, la Aleación 600 y la Aleación 690, se pueden procesar termomecánicamente por ciertos procesos conocidos para producir productos que tengan tamaños de grano definidos con una distribución intergranular de carburos $M_{23}C_6$ precipitados y sin reducción del cromo en los granos. La precipitación intergranular de carburos $M_{23}C_6$ entre los granos en aleaciones a base de níquel reduce significativamente la sensibilización de las aleaciones en entornos agresivamente corrosivos, lo que aumenta significativamente la resistencia al IGSCC.

En diversas realizaciones no limitantes, los procesos descritos en el presente documento se pueden utilizar para tratar termomecánicamente aleaciones a base de níquel tal como, por ejemplo, la Aleación 600 y la aleación de 690. Las piezas de trabajo de Aleación 690 tratadas de acuerdo con los procesos termomecánicos descritos en el presente documento tienen una composición química que comprende (en porcentaje respecto al peso/masa total de la aleación): al menos 58,0 % de níquel; 27,0 % a 31,0 % de cromo; 7,0 % a 1,0 % de hierro; hasta 0,5 % de manganeso; hasta 0,05 % de carbono; hasta 0,5 % de cobre; hasta 0,5 % de silicio; hasta 0,015 % de azufre; e impurezas secundarias. En varias realizaciones, piezas de trabajo de la Aleación 690 tratadas en este sentido pueden tener una composición química que comprende cualquiera de los subintervalos elementales incluidos dentro de los intervalos elementales descritos anteriormente. Por ejemplo, una pieza de trabajo de Aleación 690 tratada de acuerdo con las realizaciones de los procesos termomecánicos descritos en el presente documento pueden comprender (en porcentaje respecto al peso/masa total de la aleación): al menos 59,0 % de níquel; 28,0 % a 30,0 % de cromo; 8,0 % a 10,0 % de hierro; hasta 0,25 % de manganeso; 0,010 % a 0,040 % de carbono; hasta 0,25 % de cobre; hasta 0,25 % de silicio; hasta 0,010 % de azufre; e impurezas secundarias. En varias realizaciones no limitantes, todos los componentes elementales de la aleación descritos en esta memoria descriptiva de estar "hasta" una cantidad máxima especificada incluyen también cantidades "mayores que cero hasta" la cantidad máxima especificada.

En varias realizaciones no limitantes, se pueden producir lingotes de aleaciones a base de níquel mediante fusión por inducción en vacío (VIM) de materiales de alimentación para producir una aleación que comprende una composición química conforme a una especificación de composición predeterminada. Por ejemplo, se pueden utilizar materiales de alimentación para producir una aleación que comprende una composición química conforme a las especificaciones para la Aleación 690 descrita anteriormente. La aleación fundida producida por VIM, por ejemplo, puede ser fundida en un lingote inicial. En varias realizaciones no limitantes, el lingote inicial se puede utilizar como un electrodo de entrada para una o más operaciones de refusión por arco en vacío (VAR) y/o de refusión por electroescoria (ESR) para producir un lingote refinado. En varias realizaciones no limitantes, se pueden utilizar otras operaciones iniciales de fusión o refusión conocidas en la técnica, tal como, por ejemplo, la descarburación con argón y oxígeno (AOD) y/o la desgasificación en vacío, solos o en combinación con VAR y/o ESR, para producir lingotes de la aleación a base de níquel.

En varias realizaciones no limitantes, un lingote de la aleación a base de níquel se puede homogeneizar utilizando prácticas de tratamiento térmico estándar y/o forjado para producir una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel. Por ejemplo, un lingote de la aleación a base de níquel (en un estado fundido, refinado u homogeneizado) puede ser forjado en prensa para producir una pieza de trabajo que se utilizará como una entrada para posteriores operaciones de procesamiento termomecánico. En otras varias realizaciones no limitantes, un lingote de la aleación a base de níquel (en un estado fundido, refinado u homogeneizado) se puede transformar por forja en una pieza de trabajo preforma que tenga cualquier forma y dimensiones adecuadas para posteriores operaciones de procesamiento termomecánico.

De acuerdo con la invención, las operaciones del procesamiento termomecánico comprenden al menos dos etapas de calentamiento y al menos dos etapas de trabajo. Una primera etapa de calentamiento comprende calentar una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel a una temperatura supersolvus del carburo. Una primera etapa de trabajo comprende trabajar (por ejemplo, forjando o laminando) la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel, en el que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel esté a una temperatura supersolvus del carburo cuando

comienza el trabajado. Una segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel a una temperatura subsolvus del carburo. Una segunda etapa de trabajo comprende trabajar (por ejemplo, forjando o laminando) la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel, en la que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel esté a una temperatura subsolvus del carburo cuando comienza el trabajado.

5 Como se utiliza en el presente documento, incluidas las reivindicaciones, los términos "primero", "segundo", "antes", "después", y similares, cuando se utilizan en relación con un etapa u operación, no excluyen la posibilidad de etapas u operaciones anteriores, intermedias y/o posteriores. Por ejemplo, en varias realizaciones no limitantes, los métodos de procesamiento termomecánico que comprenden las etapas de calentamiento "primera" y "segunda" y las etapas de trabajo "primera" y "segunda" pueden comprender además un calentamiento, trabajado y/u otras etapas adicionales antes, entre y/o después de las etapas de calentamiento "primera" y "segunda" y de las etapas de trabajo "primera" y "segunda" especificadas.

15 Como se utiliza en el presente documento, el término "temperatura supersolvus del carburo" se refiere a temperaturas al menos tan grandes como la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de una aleación. Como se utiliza en el presente documento, el término "temperatura subsolvus del carburo" se refiere a temperaturas menores que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de una aleación. La temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de una aleación es la temperatura más baja a la que esencialmente todo el carbono presente en la aleación está en solución sólida y la aleación no comprende ninguna fase o precipitado del carburo $M_{23}C_6$ metalográficamente observable. La temperatura solvus del carburo $M_{23}O_6$ de una aleación depende de la composición química de la aleación, en particular del contenido de carbono. Por ejemplo, la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la Aleación 690 puede variar de aproximadamente 1.915 °F a 2.115 °F (de 1.046 °C a 1.157 °C) para concentraciones de carbono que varían de 0,02 % a 0,05 %, en peso, para una composición nominal de 29,0 % de cromo, 9,0 % de hierro, 0,2 % de cobre, 0,2 % de silicio, 0,2 % de manganeso, 0,01 % de azufre, 0,25 de aluminio, 0,25 de titanio, 0,008 de nitrógeno, y 60,842 % a 60,872 % de níquel, calculado utilizando el software JMatPro, disponible de Sente Software, Surrey, Reino Unido. Las temperaturas solvus del carburo pueden determinarse de forma empírica o aproximada utilizando el cálculo del diagrama de fases y software de simulación de las propiedades de los materiales tal como, por ejemplo, software JMatPro, o software Pandat, disponible de CompuTherm LLC, Madison, Wisconsin, EE.UU.

30 Como se utiliza en el presente documento, calentar una pieza de trabajo "hasta" una temperatura o intervalo de temperatura especificado indica calentar la pieza de trabajo durante un tiempo suficiente para llevar la temperatura de toda la pieza de trabajo, incluidas las partes internas del material de la pieza de trabajo, "hasta" la temperatura especificada o dentro del intervalo de temperatura especificado. Del mismo modo, un estado de una pieza de trabajo que es calentada "hasta" una temperatura o intervalo de temperatura especificado indica que la pieza de trabajo es calentada durante un tiempo suficiente para llevar la temperatura de toda la pieza de trabajo, incluidas las partes internas del material de la pieza de trabajo, hasta la temperatura especificada o dentro del intervalo de temperatura especificado. La cantidad de tiempo necesaria para calentar una pieza de trabajo "hasta" una temperatura o intervalo de temperatura dependerá, por ejemplo, de la forma y dimensiones de la pieza de trabajo y de la conductividad térmica del material de la pieza de trabajo.

40 Como se utiliza en el presente documento, calentar una pieza de trabajo durante un período de tiempo o intervalo de tiempo especificado "a esa" temperatura o intervalo de temperatura especificado (es decir, tiempo a esa temperatura) indica calentar la pieza de trabajo durante el tiempo o intervalo de tiempo especificado medido desde el momento en que la temperatura de la superficie de la pieza de trabajo (medida, por ejemplo, utilizando un termopar, pirómetro, o similar) alcanza ± 25 °F (± 14 °C) de la temperatura o intervalo de temperatura especificado. Como se utiliza en el presente documento, un tiempo a esa temperatura especificado no incluye el tiempo de precalentamiento para llevar la temperatura de la superficie de la pieza de trabajo hasta dentro de ± 25 °F (± 14 °C) de la temperatura o intervalo de temperatura especificado. Como se utiliza en el presente documento, el término "tiempo de horno" indica la cantidad de tiempo que una pieza de trabajo es mantenida dentro de un entorno de temperatura controlada, tal como, por ejemplo, un horno, y no incluye el tiempo necesario para llevar el entorno de temperatura controlada a la temperatura o intervalo de temperatura especificado.

55 Como se utiliza en el presente documento, forja, trabajado, o realizar otro procesamiento mecánico sobre una pieza de trabajo "a" una temperatura o intervalo de temperatura especificado indica que la temperatura de toda la pieza de trabajo, incluidas las partes internas del material de la pieza de trabajo, está a la temperatura o intervalo de temperatura especificado cuando comienza la forja, trabajado u otro procesamiento mecánico. Se contempla que el enfriamiento y/o el calentamiento adiabático de la superficie de una pieza de trabajo durante la forja, trabajado u operaciones similares "a" una temperatura o intervalo de temperatura especificado puede cambiar la temperatura de partes de una pieza de trabajo de la especificada durante la operación.

60 De acuerdo con la invención, un proceso de tratamiento termomecánico comprende una primera etapa de calentamiento que comprende calentar una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel hasta una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada es trabajada para una reducción en área de 20 % a 70 % en una primera etapa de trabajo para proporcionar una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel trabajada. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada está a una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ al

comienzo de la primera etapa de trabajo. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel trabajada es calentada en una segunda etapa de calentamiento hasta una temperatura mayor que 1.700 °F (926 °C) y menor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel trabajada se mantiene a elevada temperatura y no se deja enfriar hasta la temperatura ambiente entre la finalización de la primera etapa de trabajo y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel es trabajada para una segunda reducción en área de 20% a 70% en una segunda etapa de trabajo. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel está a una temperatura mayor que 1.700 °F (926 °C) y menor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel al comienzo de la segunda etapa de trabajo. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel puede ser enfriada con aire hasta la temperatura ambiente después de la finalización de la segunda etapa de trabajo.

En varias realizaciones descritas, la primera etapa de calentamiento, en la que una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel es calentada hasta una temperatura supersolvus del carburo, puede comprender calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel en un horno que funciona de 2.000 °F a 2.125 °F (de 1.093 °C a 1.163 °C) durante al menos 6,0 horas (360 minutos) de tiempo a esa temperatura. Una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel se puede calentar hasta una temperatura supersolvus del carburo mediante calentamiento en un horno que funciona de 2.000 °F a 2.125 °F (1.093 °C a 1.163 °C), o cualquier subintervalo incluido en el mismo, tal como, por ejemplo, de 2.000 °F a 2.100 °F (de 1.093 °C a 1.149 °C), de 2.000 °F a 2.075 °F (de 1.093 °C a 1.135 °C), de 2.000 °F a 2.050 °F (de 1.093 °C a 1.121 °C), de 2.025 °F a 2.075 °F (de 1.107 °C a 1.135 °C), de 2.050 °F a 2.125 °F (de 1.121 °C a 1.163 °C), de 2.050 °F a 2.100 °F (de 1.121 °C a 1.149 °C), o similares.

La segunda etapa de calentamiento, en la que una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel trabajada es calentada hasta una temperatura subsolvus del carburo, comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel en un horno que funciona a una temperatura mayor que 1.700 °F (927 °C) y menor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel durante un tiempo de horno de más de 2,0 horas (120 minutos). Una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel se puede calentar a una temperatura subsolvus del carburo mediante calentamiento en un horno que funciona de 1.700 °F a 1.950 °F (de 926 °C a 1.066 °C), o cualquier subintervalo incluido en el mismo, tal como, por ejemplo, de 1.750 °F a 1.925 °F (de 954 °C a 1.052 °C), de 1.750 °F a 1.825 °F (de 954 °C a 996 °C), de 1.825 °F a 1.925 °F (de 996 °C a 1.052 °C), de 1.775 °F a 1.900 °F (de 968 °C a 1.038 °C), de 1.800 °F a 1.875 °F (de 982 °C a 1024 °C), de 1.800 °F a 1.850 °F (de 982 °C a 1.010 °C), o similares. En varias realizaciones, la segunda etapa de calentamiento puede comprender calentar una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel en un horno que funciona a una temperatura subsolvus del carburo durante un tiempo de horno mayor que 2,0 horas (120 minutos) hasta 10,0 horas (600 minutos), o cualquier subintervalo incluido en el mismo, tal como, por ejemplo, de 2,5 a 8,0 horas (150-480 minutos), de 3,0 a 10,0 horas (180-600 minutos), de 3,0 a 8,0 horas (180-480 minutos), de 4,0 a 8,0 horas (240-480 minutos), de 5,0 a 8,0 horas (300-480 minutos), o similares.

La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel se mantiene a temperatura elevada y no se deja que se enfríe hasta la temperatura ambiente entre la finalización de la primera etapa de trabajo y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento. Por ejemplo, una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel se puede mantener a temperaturas no menores que una temperatura que sea 300 °F (167 °C) por debajo de la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación. En varias realizaciones no limitantes, una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel se puede mantener a temperaturas no menores que una temperatura que sea 200 °F (111 °C), 150 °F (83 °C) o 100 °F (56 °C) por debajo de la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación. En varias realizaciones no limitantes, una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel se puede mantener a una temperatura de al menos 1.700 °F (927 °C) entre la finalización de la primera etapa de trabajo y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento. En varias realizaciones no limitantes, una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel se puede mantener a una temperatura de al menos 1.750 °F (954 °C), 1.800 °F (982 °C), 1.850 °F (1.010 °C), 1.900 °F (1.038 °C), o 1.950 °F (1.066 °C) entre la finalización de la primera etapa de trabajo y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento.

En varias realizaciones no limitantes, la primera etapa de trabajo, la segunda etapa de trabajo y cualquiera de las etapas de trabajo posteriores, pueden reducir juntas el área de la sección transversal de una pieza de trabajo en un 40 % a un 95 % con respecto al área de la sección transversal de la pieza de trabajo antes de la primera etapa de trabajo. La primera etapa de trabajo, la segunda etapa de trabajo y cualquiera de las etapas de trabajo posteriores, pueden producir, de forma independiente, reducciones en área de un 20 % a un 70 %, o cualquier subintervalo incluido en ellas tal como, por ejemplo, 30 % a 70 %, 40 % a 60 %, 45 % a 55 % o similares. La reducción en área producida por la primera etapa de trabajo se calcula basándose en el área inicial de la sección transversal de la pieza de trabajo antes de la primera etapa de trabajo. La reducción en área producida por la segunda etapa de trabajo se calcula basándose en el área de la sección transversal trabajada producida por la primera etapa de trabajo. La reducción en área de cualquier etapa de trabajo posterior se puede calcular basándose en el área de la sección transversal trabajada producida por la etapa de trabajo precedente.

En varias realizaciones no limitantes, la primera etapa de trabajo, la segunda etapa de trabajo y cualquiera de las etapas de trabajo posteriores, pueden comprender independientemente una o más pasadas a través del equipo utilizado para realizar la particular etapa de trabajo. Por ejemplo, una primera etapa de trabajo puede comprender

- una o más pasadas a través de una forja rotativa para reducir el área de la sección transversal de una pieza de trabajo en un 20 % a un 70 %, y una segunda etapa de trabajo puede comprender una o más pasadas a través de la forja rotativa para reducir el área de la sección transversal de la pieza de trabajo en un 20 % a un 70 % en relación con el área de la sección transversal trabajada de la pieza de trabajo producida por la primera etapa de trabajo. La reducción total en área producida por la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo puede ser de 40 % a 95 % en relación con el área de la pieza de trabajo antes de la primera etapa de trabajo. La reducción en área producida por cada pasada individual a través de la forja rotativa puede ser, por ejemplo, 5 % a 25 % en relación con el área de la sección transversal intermedia producida por la pasada precedente.
- 10 La pieza de trabajo de aleación a base de níquel calentada está a una temperatura superior a la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ al comienzo de la primera etapa de trabajo, y la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada está a una temperatura mayor que 1.750 °F (927 °C) y menor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel al comienzo de la segunda etapa de trabajo. En varias realizaciones no limitantes, una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada puede estar a una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ durante toda la primera etapa de trabajo. La pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada puede estar a una temperatura mayor que 1.700 °F (927 °C) y menor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel durante toda la segunda etapa de trabajo. Por ejemplo, los troqueles, yunques y/o rodillos utilizados para realizar una operación de trabajo se pueden calentar para minimizar o eliminar la pérdida de calor debido a la conducción desde las superficies de la pieza de trabajo en contacto con los troqueles, yunques, y/o rodillos de trabajo. Además, el calentamiento adiabático del material de la pieza de trabajo que se deforma durante las etapas de trabajo puede compensar, al menos en parte, la pérdida de calor de la pieza de trabajo.
- 25 En varias realizaciones no limitantes, la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo pueden comprender independientemente una o más operaciones de forjado o de laminación, tal como, por ejemplo, laminación plana, laminación de anillos, laminación por rodillos, forjado en prensa, extrusión, forja rotativa, y similares. En varias realizaciones, la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo pueden comprender, cada una, una o más pasadas de forja rotativa.
- 30 Como se utiliza en el presente documento, la expresión "forja rotativa" se refiere al trabajado de piezas de trabajo alargadas, tal como, por ejemplo, tubos, barras y varillas, utilizando dos o más yunques/troqueles para deformar por compresión la pieza de trabajo perpendicular al eje longitudinal de la pieza de trabajo, disminuyendo de ese modo el área de la sección transversal de la pieza de trabajo y aumentando la longitud de la pieza de trabajo para producir productos largos. Una operación 100 de forja rotativa se ilustra en las Figuras 1A y 1B en las que una pieza de trabajo 102 cilíndrica de tipo barra/varilla se deforma por compresión mediante yunques/troqueles 104, disminuyendo de ese modo el área de la sección transversal de la pieza de trabajo y aumentando la longitud de la pieza de trabajo. La forja rotativa produce productos largos sólidos o tubulares con secciones transversales constantes o variables a lo largo de su longitud. La forja rotativa, también conocida como estampación rotativa o forja radial, no se debe confundir con la forja orbital (es decir, de troquel oscilante) en la que una pieza de trabajo es prensada entre un yunque/troquel plano que no gira y un troquel basculante (oscilante) con una cara de trabajo cónica que realiza movimientos orbitales, espirales, planetarios o en línea recta.
- 40 El proceso de tratamiento termomecánico comprende una primera etapa de calentamiento que comprende calentar una pieza de trabajo de Aleación 690 hasta una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación. Por ejemplo, la primera etapa de calentamiento puede comprender calentar una pieza de trabajo de Aleación 690 hasta una temperatura en el intervalo de 2.000 °F a 2.125 °F (de 1.093 °C a 1.163 °C). La pieza de trabajo de la Aleación 690 tiene una composición química que comprende, en peso, hasta 0,05 % de carbono; 27,0 % a 31,0 % de cromo; hasta 0,5 % de cobre; 7,0 % a 11,0 % de hierro; hasta 0,5 % de manganeso; hasta 0,015 % de azufre; hasta 0,5 % de silicio; al menos 58 % de níquel; e impurezas secundarias.
- 50 La pieza de trabajo de la Aleación 690 calentada puede someterse a forja rotativa para una reducción en área de 20 % a 70 % en una primera etapa de forja que comprende una o más pasadas de forja rotativa. La pieza de trabajo de la Aleación 690 calentada puede ser calentada a una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ en el comienzo de la primera etapa de forja, tal como por ejemplo, a una temperatura en el intervalo de 2.000 °F a 2.125 °F (de 1.093 °C a 1.163 °C) cuando comienza la primera etapa de forja. La pieza de trabajo de aleación 690 forjada puede calentarse en una segunda etapa de calentamiento a una temperatura mayor que 1.700 °F (926 °C) y menor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel. Por ejemplo, la segunda etapa de calentamiento puede comprender calentar una pieza de trabajo de Aleación 690 forjada hasta una temperatura en el intervalo de 1.750 °F a 1.925 °F (de 954 °C a 1.052 °C). La pieza de trabajo de la Aleación 690 forjada se puede mantener a una temperatura de al menos 1.700 °F (926 °C) entre la finalización de la primera etapa de forja y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento.
- 60 La pieza de trabajo de la Aleación 690 calentada se puede someter a forja rotativa para una segunda reducción en área de un 20 % a un 70 % en una segunda etapa de forja que comprende una o más pasadas de forja rotativa. La pieza de trabajo de la Aleación 690 calentada puede estar a una temperatura mayor que 1.700 °F (926 °C) y menor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ al comienzo de la segunda etapa de forja, tal como, por ejemplo, a una

temperatura en el intervalo de 1.750 °F a 1.925 °F cuando comienza la segunda etapa de forja. La pieza de trabajo de la Aleación 690 puede ser enfriada con aire hasta la temperatura ambiente después de la finalización de la segunda etapa de forja.

- 5 En varias realizaciones no limitantes, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel, tal como piezas de trabajo de Aleación 690, pueden ser adicionalmente tratadas con calor después de, al menos, dos etapas de calentamiento y las, al menos, dos etapas de trabajo. Por ejemplo, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser recocidas a una temperatura de al menos 1.800 °F (982 °C), pero no mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel, durante al menos 3,0 horas de tiempo a esa temperatura.
- 10 En varias realizaciones no limitantes, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser recocidas a una temperatura de 1.800 °F a 2.000 °F (de 982 °C a 1.093 °C), o cualquier subintervalo incluido en el mismo, tal como, por ejemplo, de 1.840 °F a 1.960 °F (de 1.004 °C a 1.071 °C), de 1.850 °F a 1.950 °F (de 1.010 °C a 1.066 °C), de 1.875 °F a 1.925 °F (de 1.024 °C a 1.052 °C), o similares. En varias realizaciones no limitantes, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser recocidas durante al menos 4,0 horas de tiempo a esa temperatura.
- 15 En varias realizaciones no limitantes, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser enfriadas con agua después del tratamiento térmico del recocido.

- 20 En varias realizaciones no limitantes, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel, tal como piezas de trabajo de Aleación 690, pueden ser envejecidas después de, al menos, dos etapas de calentamiento y las, al menos, dos etapas de trabajo. Por ejemplo, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser envejecidas a una temperatura de 1.300 °F a 1.400 °F (de 704 °C a 760 °C) durante al menos 3,0 horas de tiempo a esa temperatura. En varias realizaciones no limitantes, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser envejecidas a una temperatura de 1.300 °F a 1.400 °F (de 704 °C a 760 °C), o cualquier subintervalo incluido en el mismo, tal como, por ejemplo, de 1.325 °F a 1.375 °F (de 718 °C a 746 °C), de 1.310 °F a 1.360 °F (de 710 °C a 738 °C), o similares. En varias realizaciones no limitantes, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser envejecidas durante al menos 4,0 horas de tiempo a esa temperatura. En varias realizaciones no limitantes, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser enfriadas con aire después de tratamiento térmico de envejecimiento.

- 30 En varias realizaciones no limitantes, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser recocidas y envejecidas. Por ejemplo, después de las, al menos, dos etapas de calentamiento y de las, al menos, dos etapas de trabajo, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser enfriadas con aire hasta la temperatura ambiente y después recocidas a una temperatura de al menos 1.800 °F (982 °C), pero no mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel, durante al menos 3,0 horas de tiempo a esa temperatura.
- 35 Las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel pueden ser enfriadas rápidamente con agua después del tratamiento térmico de recocido y después envejecidas a una temperatura de 1.300 °F a 1.400 °F (de 704 °C a 760 °C) durante al menos 3,0 horas de tiempo a esa temperatura.

- 40 Los procesos descritos en el presente documento pueden usarse, por ejemplo, para producir productos forjados y/o laminados. Por ejemplo, en varias realizaciones no limitantes las, al menos, dos etapas de calentamiento y las, al menos, dos etapas de trabajo transforman las piezas de trabajo preforma en productos que incluyen productos largos, tal como, por ejemplo, barra y varilla redondas, barra y varilla rectangulares, barra y varilla hexagonales, productos largos rectangulares forjados, y productos largos rectangulares laminados. Los procesos divulgados en el presente documento pueden usarse, por ejemplo, para producir productos largos con secciones transversales constantes o variables a lo largo de su longitud. En realizaciones que producen productos largos que tienen secciones transversales variables a lo largo de su longitud, la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo pueden reducir juntas el área de la sección transversal de una pieza de trabajo en un 40 % a un 95 % en uno o más sitios a lo largo de la longitud del producto largo. Además, los procesos divulgados en el presente documento pueden usarse, por ejemplo, para producir tubos de forja rotativa.

- 50 En varias realizaciones no limitantes, los productos producidos por los procesos descritos en el presente documento pueden satisfacer los requisitos de la norma ASTM B166-08: *Standard Specification for Nickel-Chromium-Iron Alloys (UNS N06600, N06601, N06603, N06690, N06693, N06025, N06045, and N06696) and Nickel-Chromium-Cobalt-Molybdenum Alloy (UNS N06617) Rod, Bar, and Wire (2008)*, and ASME SB-166: *Specification for Nickel-Chromium-Iron Alloys (UNS N06600, N06601, N06603, N06690, N06693, N06025, N06045, and N06696) and Nickel-Chromium-Cobalt-Molybdenum Alloy (UNS N06617) Rod, Bar, and Wire (2007)* [Especificación estándar para barra, varilla y alambre de aleaciones de níquel-cromo-hierro (UNS N06600, N06601, N06603, N06690, N06693, N06025, N06045 y N06696) y de aleación de níquel-cromo-cobalto-molibdeno (UNS N06617) (2008)], y ASME SB-166: *Especificación para varilla, barra y alambre de aleaciones de níquel-cromo-hierro (UNS N06600, N06601, N06603, N06690, N06693, N06025, N06045 y N06696) y de aleación de níquel-cromo-cobalto-molibdeno (UNS N06617) (2007)*].

- 65 En varias realizaciones no limitantes, los productos producidos por los procesos descritos en el presente documento pueden tener un tamaño de grano de ASTM n.º 3,0 a 9,0, determinado de acuerdo con la norma ASTM E112-10: *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size (2010)* [Métodos de ensayo convencionales para determinar el tamaño medio de grano (2010)]. En varias realizaciones no limitantes, los productos producidos por los

procesos descritos en el presente documento pueden tener un tamaño de grano en el intervalo de ASTM n.º 3,0 a 9,0, o cualquier subintervalo incluido en el mismo, tal como, por ejemplo, ASTM n.º 3,0 a 8,0, 3,5 a 7,5, 4,0 a 7,0, 4,5 a 6,5, 3,0 a 7,0, 3,0 a 6,0, o similares. En varias realizaciones no limitantes, los productos producidos por los procesos descritos en el presente documento pueden comprender precipitados intergranulares del carburo $M_{23}C_6$ distribuidos uniformemente en los bordes de los granos. En varias realizaciones no limitantes, los productos producidos por los procesos descritos en el presente documento pueden comprender mínimos precipitados intragranulares del carburo $M_{23}C_6$ metalográficamente observables. En varias realizaciones no limitantes, los productos producidos por los procesos descritos en el presente documento pueden carecer de precipitados intragranulares del carburo $M_{23}C_6$ metalográficamente observables.

La distribución microestructural del carburo puede determinarse metalográficamente, por ejemplo, mediante el uso de la microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar muestras atacadas químicamente (por ejemplo, con solución de ataque químico de bromo-metanol) de la aleación a base de níquel procesada de acuerdo con varias realizaciones no limitantes descritas en el presente documento. Por ejemplo, en varias realizaciones no limitantes, los productos producidos por los procesos descritos en el presente documento, cuando se evaluaron utilizando la SEM de 500 aumentos, pueden comprender precipitados intergranulares del carburo $M_{23}C_6$ distribuidos uniformemente en todos los bordes observables de los granos y comprenden mínimos precipitados, o ninguno, intragranulares del carburo $M_{23}C_6$ observables. En varias realizaciones no limitantes, los productos producidos por los procesos descritos en el presente documento comprenden granos equiaxiales con un tamaño de grano de ASTM n.º 3,0-9,0, una uniforme distribución del tamaño de grano, precipitados intergranulares del carburo $M_{23}C_6$ uniformemente distribuidos en los bordes de los granos metalográficamente observables, y mínimos precipitados intragranulares del carburo $M_{23}C_6$ metalográficamente observables.

Los procesos descritos en el presente documento reducen o eliminan el anormal crecimiento del grano que crea una distribución de tamaño de grano no uniforme en una escala macroscópica. Para controlar el tamaño de grano dentro de límites especificados, las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel, tal como, por ejemplo, las piezas de trabajo de Aleación 690, se pueden trabajar en caliente a temperaturas por encima tanto de la temperatura de recristalización como de la temperatura solvus del carburo de la aleación, es decir, que trabaja a temperaturas supersolvus. Sin embargo, tratamientos térmicos posteriores para producir una distribución uniforme de precipitados intergranulares del carburo $M_{23}C_6$ causan a menudo un crecimiento anormal y no uniforme del grano en secciones de la macroestructura de las piezas de trabajo. Por ejemplo, las varillas y barras redondas trabajadas en caliente de la aleación a base de níquel tal como, por ejemplo, Aleación 690, tienden a desarrollar una zona en forma de anillo de anormal crecimiento del grano a través de la sección transversal del producto. Las Figuras 2A y 2B ilustran esquemáticamente un producto 200 largo tal como, por ejemplo, una varilla o una barra redonda de la aleación a base de níquel tal como Aleación 690. El producto 200 largo incluye una zona 205 con forma de anillo de anormal crecimiento del grano a través de la sección transversal del producto.

Sin desear quedar ligado a teoría alguna, se cree que el trabajo en caliente a temperaturas supersolvus para controlar el tamaño de grano produce una tensión interna intrínseca en las piezas de trabajo que causa el anormal crecimiento del grano. Se cree que la tensión interna intrínseca es causada por la expansión térmica diferencial de la pieza de trabajo durante el trabajo en caliente y el enfriamiento después del trabajo en caliente. El material de la superficie de las piezas de trabajo se enfría mucho más rápidamente que el material interno, en particular el material hacia el centro de la pieza de trabajo, cuando está en contacto con troqueles/yunques de trabajo y durante el posterior enfriamiento. Esto establece una brusca diferencia de temperatura entre el material más frío en la superficie y cerca de la superficie y el material interno más caliente. El diferencial de temperatura da como resultado la expansión térmica diferencial desde la alta temperatura en el centro hasta la baja temperatura en la superficie del producto trabajado en caliente, que se cree que produce una tensión interna intrínseca en el material. Durante los tratamientos térmicos posteriores para producir una distribución uniforme de precipitados intergranulares del carburo $M_{23}C_6$, se cree que la tensión interna impulsa el anormal crecimiento del grano, que se localiza en las zonas de la tensión interna causada por la expansión térmica diferencial durante el enfriamiento. Se cree que esto da como resultado zonas en forma de anillo observadas de crecimiento anormal del grano y no uniforme en la macroestructura de los productos.

Estas zonas perjudiciales de anormal crecimiento del grano pueden ser mitigadas trabajando las piezas de trabajo de la aleación a base de níquel tal como, por ejemplo, piezas de trabajo de Aleación 690, a temperaturas inferiores a la temperatura solvus del carburo de la aleación, es decir, a temperaturas subsolvus. Sin embargo, después del trabajado a temperaturas subsolvus, tratamientos térmicos posteriores para producir una distribución uniforme de precipitados intergranulares del carburo $M_{23}C_6$ causan a menudo el crecimiento inaceptable del grano a lo largo de toda la pieza de trabajo. El tamaño de grano es difícil de controlar y los tratamientos térmicos producen a menudo tamaños de grano mayores que ASTM n.º 3,0 (es decir, ASTM n.º menores que 3,0). Además, todos los carburos no se disuelven durante el trabajo a temperaturas subsolvus. Como resultado, la distribución intergranular del carburo producido durante los tratamientos térmicos posteriores incluye a menudo grandes larguerillos del carburo en el borde del grano que estaban presentes entre los granos grandes en las piezas de trabajo preforma y que no se disolvieron ni antes, ni durante ni después del trabajado a temperaturas subsolvus.

Los procesos descritos en el presente documento reducen o eliminan el anormal crecimiento del grano que crea una distribución de tamaño de grano no uniforme en una escala macroscópica, y produce productos que tienen granos equiaxiales con un tamaño de grano de ASTM n.º 3,0 a 9,0, una distribución uniforme del tamaño de grano, precipitados intergranulares del carburo $M_{23}C_6$ uniformemente distribuidos en los bordes de los granos, y mínimos precipitados intragranulares del carburo $M_{23}C_6$. En la primera de las, al menos, dos etapas de calentamiento, una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel es calentada a una temperatura supersolvus del carburo, lo cual disuelve la totalidad de los carburos $M_{23}C_6$ presentes en la pieza de trabajo preforma. En la primera de las, al menos, dos etapas de trabajo, la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel es trabajada a una temperatura supersolvus de carburo, por ejemplo, para una reducción en área de un 20 % a un 70 %. El trabajado a la temperatura supersolvus del carburo impide la precipitación de carburos y produce una distribución de tamaño de grano uniforme con tamaños de grano en el intervalo de ASTM n.º 3,0 a 9,0.

En la segunda de las, al menos, dos etapas de calentamiento, la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel es calentada a una temperatura subsolvus del carburo. La pieza de trabajo se estabiliza a las temperaturas subsolvus y no se le deja que se enfríe hasta la temperatura ambiente entre la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de calentamiento. Esto reduce al mínimo cualquier precipitación del carburo porque el material de la pieza no se enfría a través de la zona crítica "nariz" de la curva de transformación tiempo-temperatura (TTT) del material, en la que la cinética de precipitación del carburo es más rápida. La nucleación y precipitación de carburos es muy lenta a temperaturas subsolvus del carburo dentro de aproximadamente 300 °F (167 °C) de la temperatura solvus del carburo, por ejemplo. Esto impide la precipitación descontrolada del carburo. En la segunda de las, al menos, dos etapas de trabajo, la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel es trabajada a una temperatura subsolvus del carburo, por ejemplo, para una reducción en área de un 20 % a un 70 %. El trabajado a la temperatura subsolvus del carburo reduce la expansión térmica diferencial y la tensión interna intrínseca en el material que se cree causa el anormal crecimiento del grano durante los tratamientos térmicos posteriores.

Los ejemplos no limitantes y no exhaustivos que siguen están destinados a describir con más detalle varias realizaciones no limitantes y no exhaustivas sin restringir el alcance de las realizaciones descritas en esta memoria descriptiva.

30 Ejemplos

Las series de Aleación 690 se prepararon por fusión de materiales de alimentación utilizando VIM. Las composiciones químicas de las series de Aleación 690 estaban en conformidad con ASTM B166-08: *Standard Specification for Nickel-Chromium-Iron Alloys (UNS N06600, N06601, N06603, N06690, N06693, N06025, N06045, and N06696) and Nickel-Chromium-Cobalt-Molybdenum Alloy (UNS N06617) Rod, Bar, and Wire (2008), and ASME SB-166: Specification for Nickel-Chromium-Iron Alloys (UNS N06600, N06601, N06603, N06690, N06693, N06025, N06045, and N06696) and Nickel-Chromium-Cobalt-Molybdenum Alloy (UNS N06617) Rod, Bar, and Wire (2007)* [Especificación convencional para barra, varilla y alambre de aleaciones de níquel-cromo-hierro (UNS N06600, N06601, N06603, N06690, N06693, N06025, N06045 y N06696) y de aleación de níquel-cromo-cobalto-molibdeno (UNS N06617) (2008), y ASME SB-166: Especificación para varilla, barra y alambre de aleaciones de níquel-cromo-hierro (UNS N06600, N06601, N06603, N06690, N06693, N06025, N06045 y N06696) y de aleación de níquel-cromo-cobalto-molibdeno (UNS N06617) (2007)].

Las series VIM se fundieron en lingotes iniciales que se utilizaron como electrodos de entrada para ESR. La operación de ESR produjo lingotes cilíndricos refinados con diámetros de aproximadamente 20 pulgadas (508 milímetros). Los lingotes de ESR de 20 pulgadas se homogeneizaron utilizando prácticas convencionales y forja en prensa para producir piezas de trabajo cilíndricas con diámetros de aproximadamente 14 pulgadas (356 milímetros).

Las piezas de trabajo se trataron termomecánicamente de acuerdo con los procesos descritos en el presente documento que comprenden dos etapas de calentamiento y dos etapas de trabajo. En una primera etapa de calentamiento, las piezas de trabajo se calentaron en un horno que funciona de 2.000 °F a 2.050 °F (de 1.093 °C a 1.121 °C) durante al menos 6 horas de tiempo a esa temperatura. En una primera etapa de trabajo, las piezas de trabajo calentadas se sometieron a forja rotativa hasta diámetros de aproximadamente 9,6 pulgadas (243 milímetros), que corresponde a una reducción en área de aproximadamente un 53 %. La primera etapa de trabajo comprendía cuatro pasadas a través de la forja rotativa, produciendo cada pasada una reducción en área de aproximadamente un 17 % a un 18 %. Toda la pieza de trabajo estaba a una temperatura en el intervalo de aproximadamente 2.000 °F a 2.050 °F cuando comenzaba la primera etapa de trabajo. Durante las pasadas de la forja rotativa, las temperaturas superficiales en troquel y fuera del troquel de las piezas de trabajo se mantuvieron en el intervalo de 1.700 °F a 2.050 °F (de 927 °C a 1.121 °C) durante las cuatro (4) pasadas.

Después de la finalización de la forja rotativa, las temperaturas de la superficie de las piezas de trabajo no se dejaron enfriar hasta la temperatura ambiente y las piezas de trabajo se cargaron inmediatamente en un horno funcionando a 1.825 °F (996 °C). En una segunda etapa de calentamiento, las piezas de trabajo forjadas se calentaron en el horno durante un tiempo de horno de aproximadamente 1,0 hora, 2,0 horas, 4,0 horas u 8,0 horas. En una segunda etapa de trabajo, las piezas de trabajo calentadas se sometieron a forja rotativa una segunda vez hasta un diámetro de aproximadamente 7,2 pulgadas (182 milímetros), que corresponde a una reducción en área de

- aproximadamente un 44 % con respecto a los diámetros intermedios de 9,6 pulgadas (243 milímetros). La segunda etapa de trabajo comprendía tres pasadas a través de la forja rotativa, produciendo cada pasada de 17 % a 18 % de reducción en área. Toda la pieza de trabajo estaba a una temperatura de aproximadamente 1.825 °F (996 °C) cuando comenzaba la segunda etapa de trabajo. Durante la segunda etapa de trabajo, las temperaturas superficiales en troquel y fuera del troquel de las piezas de trabajo se mantuvieron en el intervalo de 1.700 °F a 2.050 °F (de 926 °C a 1.121 °C) durante las tres pasadas. Las piezas de trabajo se enfriaron con aire hasta la temperatura ambiente después de la finalización de la segunda etapa de trabajo. La reducción total en área producida por las dos etapas de trabajo era de aproximadamente un 74 %.
- 10 Las piezas de trabajo calentadas dos veces y sometidas dos veces a forja rotativa fueron recocidas a 1.875 °F (1.024 °C) durante cuatro (4) horas de tiempo a esa temperatura seguido por un enfriamiento con agua hasta la temperatura ambiente. Las piezas de trabajo enfriadas fueron envejecidas a 1.340 °F durante cuatro (4) horas de tiempo a esa temperatura y el se enfriaron con aire hasta la temperatura ambiente.
- 15 Las secciones transversales de las piezas de trabajo fueron atacadas químicamente utilizando prácticas convencionales y la macroestructura se evaluó metalográficamente. La Figura 3A es un metalografía de una sección transversal de una pieza de trabajo calentada durante aproximadamente 1 hora de tiempo de horno en un horno funcionando a 1.825 °F (996 °C) entre la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo. La Figura 3B es una metalografía de una sección transversal de una pieza de trabajo calentada durante aproximadamente 2 horas de tiempo de horno en un horno funcionando a 1.825 °F (996 °C) entre la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo. La Figura 3C es una metalografía de una sección transversal de una pieza de trabajo calentada durante aproximadamente 4 horas de tiempo de horno en un horno funcionando a 1.825 °F (996 °C) entre la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo. La Figura 3D es una metalografía de una sección transversal de una pieza de trabajo calentada durante aproximadamente 8 horas de tiempo de horno en un horno funcionando a 1.825 °F (996 °C) entre la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo.

Como se muestra en las Figuras 3A y 3B, las piezas de trabajo calentadas durante aproximadamente 1 hora y 2 horas de tiempo de horno en un horno funcionando a 1.825 °F (996 °C) desarrollaron una zona en forma de anillo de anormal crecimiento del grano. Como se muestra en Figuras 3C y 3D, las piezas de trabajo calentadas durante aproximadamente 4 horas y 8 horas de tiempo de horno en un horno funcionando a 1.825 °F (996 °C) no mostraron ningún anormal crecimiento del grano. El tamaño de grano de las piezas de trabajo calentadas durante aproximadamente 4 horas y 8 horas de tiempo de horno estaba en el intervalo de ASTM n.º 3,0 a 8,0, determinado de acuerdo con ASTM E 112-10. Las piezas de trabajo formaban precipitados intergranulares del carburo $M_{23}C_6$ distribuidos uniformemente en los bordes de los granos y exhibían mínima precipitación intragranular del carburo $M_{23}C_6$.

La divulgación abarca además lo siguiente:

1. Un proceso que comprende: una primera etapa de calentamiento que comprende calentar una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel hasta una temperatura en el intervalo de 1.093 °C (2.000 °F) hasta 1.163 °C (2.125 °F); una primera etapa de forja que comprende la forja rotativa de la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada para una reducción en área de un 30 % a un 70 %, en el que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel está a una temperatura en el intervalo de 1.093 °C (2.000 °F) hasta 1.163 °C (2.125 °F) cuando comienza la primera etapa de forja; una segunda etapa de calentamiento que comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel sometida a forja rotativa hasta una temperatura en el intervalo de 954 °C (1.750 °F) hasta 1.052 °C (1.925 °F), en el que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel sometida a forja rotativa se mantiene a temperatura elevada y no se deja enfriar hasta la temperatura ambiente entre la finalización de la primera etapa de forja y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento; y una segunda etapa de forja que comprende el forjado rotativo de la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada para una reducción en área de un 20 % a un 70 %, en la que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel está a una temperatura en el intervalo de 954 °C (1.750 °F) hasta 1.052 °C (1.925 °F) cuando comienza la segunda etapa de forja; en la que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel comprende, en peso, hasta 0,05 % de carbono, 27,0 % a 31,0 % de cromo, hasta 0,5 % de cobre, 7,0 % a 1,0 % de hierro, hasta 0,5 % de manganeso, hasta 0,015 % de azufre, hasta 0,5 % de silicio, al menos 58 % de níquel, e impurezas secundarias.
2. El proceso del párrafo 1, en el que la primera etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel en un horno que funciona de 1.093 °C (2.000 °F) a 1.163 °C (2.125 °F) durante un tiempo de al menos 6,0 horas a esa temperatura.
3. El proceso del párrafo 1, en el que la segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel sometida a forja rotativa en un horno que funciona de 954 °C (1.750 °F) a 1.052 °C (1.925 °F) durante un tiempo de horno de más de 2,0 horas.
4. El proceso del párrafo 1, en el que la segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel sometida a forja rotativa en un horno que funciona de 954 °C (1.750 °F) a 1.052 °C (1.925 °F) durante un tiempo de horno de 3,0 horas a 10,0 horas.
5. El proceso del párrafo 1, en el que la segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel sometida a forja rotativa en un horno que funciona de 954 °C (1.750 °F) a

1.052 °C (1.925 °F) durante un tiempo de horno de 4,0 horas a 8,0 horas.

6. El proceso del párrafo 1, que comprende además: fusión por inducción en vacío de materiales de alimentación para formar un lingote de la aleación a base de níquel; refusión del lingote de la aleación a base de níquel para formar un lingote de la aleación a base de níquel refinado, en el que la refusión comprende al menos una operación de refusión seleccionada del grupo que consiste en refusión por arco en vacío y refusión por electroescoria; y forjado en prensa del lingote de la aleación a base de níquel refinado para formar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel.

7. El proceso del párrafo 1, que comprende además, después de las dos etapas de calentamiento y de las dos etapas de forja: el calentamiento de la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel a una temperatura de al menos 982 °C (1.800 °F), pero no mayor que una temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel, durante al menos 3,0 horas de tiempo a esa temperatura; y el enfriamiento rápido con agua de la pieza de trabajo.

8. El proceso del párrafo 1, que comprende además, después de las dos etapas de calentamiento y de las dos etapas de forja: el envejecimiento de la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel a una temperatura de 704 °C (1.300 °F) a 760 °C (1.400 °F) durante un tiempo de al menos 3,0 horas a esa temperatura; y el enfriamiento con aire de la pieza de trabajo.

9. Un producto producido por el proceso del párrafo 1, seleccionado el producto del grupo que consiste en una varilla y una barra redonda.

10. El producto del párrafo 9, en el que el producto comprende granos equiaxiales con un tamaño de grano de ASTM N° 3,0 a 9,0, una distribución uniforme de tamaño de grano, precipitados intergranulares de carburo $M_{23}C_6$ distribuidos uniformemente sobre límites de grano metalográficamente observables y sustancialmente nada de precipitados de carburo $M_{23}C_6$ intergranular metalográficamente observables.

11. Un proceso que comprende: una primera etapa de calentamiento que comprende calentar una pieza de trabajo de la aleación a base de níquel hasta una temperatura mayor de la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel; una primera etapa de trabajo que comprende el trabajo de la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada para una reducción en área de un 20 % a un 70 %, en el que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel está a una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ cuando comienza la primera etapa de trabajo; una segunda etapa de calentamiento que comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel hasta una temperatura mayor de 927 °C (1.700 °F) y menor de la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel, en el que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel trabajada se mantiene a temperatura elevada y no se deja enfriar hasta la temperatura ambiente entre la finalización de la primera etapa de trabajo y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento; y una segunda etapa de trabajo que comprende trabajar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel calentada para una reducción en área de un 20 % a un 70 %, en la que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel está a una temperatura mayor de 927 °C (1.700 °F) y menor de la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel cuando comienza la segunda etapa de trabajo.

12. El proceso del párrafo 11, en el que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel comprende, en peso, hasta 0,05 % de carbono, 27,0 % a 31,0 % de cromo, hasta 0,5 % de cobre, 7,0 % a 11,0 % de hierro, hasta 0,5 % de manganeso, hasta 0,015 % de azufre, hasta 0,5 % de silicio, al menos 58 % de níquel; e impurezas secundarias.

13. El proceso del párrafo 11, en el que la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel comprende, en peso, hasta 0,05 % de carbono, 28,0 % a 30,0 % de cromo, hasta 0,25 % de cobre, 8,0 % a 10,0 % de hierro, hasta 0,25 % de manganeso, hasta 0,010 % de azufre, hasta 0,25 % de silicio, al menos 58 % de níquel; e impurezas secundarias.

14. El proceso del párrafo 11, en el que la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo comprenden independientemente al menos una operación seleccionada del grupo que consiste en laminación plana, laminación de anillos, laminación por rodillos, forjado en prensa, extrusión y forja rotativa.

15. El proceso del párrafo 11, en el que la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo comprenden forja rotativa.

16. El proceso del párrafo 11, en el que la primera etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel en un horno que funciona de 1.093 °C (2.000 °F) a 1.163 °C (2.125 °F) durante un tiempo de al menos 3,0 horas a esa temperatura.

17. El proceso del párrafo 11, en el que la segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel en un horno que funciona de 954 °C (1.750 °F) a 1.052 °C (1.925 °F) durante un tiempo de horno de más de 2,0 horas.

18. El proceso del párrafo 11, en el que la segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel en un horno que funciona de 954 °C (1.750 °F) a 1.052 °C (1.925 °F) durante un tiempo de horno de 3,0 horas a 10,0 horas.

19. El proceso del párrafo 11, en el que la segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel sometida a forja rotativa en un horno que funciona de 954 °C (1.750 °F) a 1.052 °C (1.925 °F) durante un tiempo de horno de 4,0 horas a 8,0 horas.

20. El proceso del párrafo 11, que comprende además: fusión por inducción en vacío de materiales de alimentación para formar un lingote de la aleación a base de níquel; refusión del lingote de la aleación a base de níquel para formar un lingote de la aleación a base de níquel refinado, en el que la refusión comprende al menos una operación de refusión seleccionada del grupo que consiste en refusión por arco en vacío y refusión por electroescoria; y forjado en prensa del lingote de la aleación a base de níquel refinado para formar la pieza de

trabajo de la aleación a base de níquel.

5 21. El proceso del párrafo 11, que comprende además, después de las dos etapas de calentamiento y de las dos etapas de trabajo: el calentamiento de la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel a una temperatura de al menos 982 °C (1.800 °F), pero no mayor que una temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel, durante al menos 3,0 horas de tiempo a esa temperatura; y el enfriamiento rápido con agua de la pieza de trabajo.

10 22. El proceso del párrafo 11, que comprende además, después de las dos etapas de calentamiento y de las dos etapas de forja: el envejecimiento de la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel a una temperatura de 704 °C (1.300 °F) a 760 °C (1.400 °F) durante un tiempo de al menos 3,0 horas a esa temperatura; y el enfriamiento con aire de la pieza de trabajo a temperatura ambiente.

23. Un producto producido por el proceso del párrafo 11.

24. El producto del párrafo 23, en el que el producto comprende un producto largo seleccionado del grupo que consiste en una varilla, una barra redonda y una barra rectangular.

15 25. El producto del párrafo 23, en el que el producto comprende granos equiaxiales con un tamaño de grano de ASTM N° 3,0 a 9,0, una distribución uniforme de tamaño de grano, precipitados intergranulares de carburo $M_{23}C_6$ distribuidos uniformemente sobre límites de grano metalográficamente observables y sustancialmente nada de precipitados de carburo $M_{23}C_6$ intergranular metalográficamente observables.

REIVINDICACIONES

1. Un proceso que comprende:

5 una primera etapa de calentamiento de calentar una pieza de trabajo de aleación a base de níquel que comprende, en peso, hasta el 0,05 % de carbono, del 27,0 % al 31,0 % de cromo, hasta el 0,5 % de cobre, del 7,0 % al 11,0 % de hierro, hasta el 0,5 % de manganeso, hasta el 0,015 % de azufre, hasta el 0,5 % de silicio, al menos el 58 % de níquel e impurezas secundarias, hasta una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel; una primera etapa de trabajo que comprende trabajar la pieza de trabajo de aleación a base de níquel calentada hasta una reducción en área de un 20 % a un 70 %, en donde la pieza de trabajo de la aleación a base de níquel está a una temperatura mayor que la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ cuando comienza la primera etapa de trabajo; una segunda etapa de calentamiento que comprende calentar la pieza de trabajo de aleación a base de níquel hasta una temperatura mayor de 927 °C (1.700 °F) y menor de la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de la aleación a base de níquel, en donde la pieza de trabajo de aleación a base de níquel trabajada se mantiene a temperatura elevada y no se deja enfriar hasta la temperatura ambiente entre la finalización de la primera etapa de trabajo y el comienzo de la segunda etapa de calentamiento; y una segunda etapa de trabajo que comprende trabajar la pieza de trabajo de aleación a base de níquel calentada para una segunda reducción en área de un 20 % a un 70 %, en donde la pieza de trabajo de aleación a base de níquel está a una temperatura mayor de 927 °C (1.700 °F) y menor de la temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de aleación a base de níquel cuando comienza la segunda etapa de trabajo.

2. El proceso de la reivindicación 1, en el que la pieza de trabajo de aleación a base de níquel comprende, en peso, hasta el 0,05 % de carbono, del 28,0 % al 30,0 % de cromo, hasta el 0,25 % de cobre, del 8,0 % al 10,0 % de hierro, hasta el 0,25 % de manganeso, hasta el 0,010 % de azufre, hasta el 0,25 % de silicio, al menos el 58 % de níquel; e impurezas secundarias.

3. El proceso de la reivindicación 1, en el que la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo comprenden independientemente al menos una operación seleccionada del grupo que consiste en laminación plana, laminación de anillos, laminación por rodillos, forjado en prensa, extrusión y forja rotativa.

4. El proceso de la reivindicación 1, en el que la primera etapa de trabajo y la segunda etapa de trabajo comprenden forja rotativa.

5. El proceso de la reivindicación 1, en el que la primera etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de aleación a base de níquel en un horno que funciona de 1.093 °C (2.000 °F) a 1.163 °C (2.125 °F) durante un tiempo de al menos 3,0 horas a esa temperatura.

6. El proceso de la reivindicación 1, en el que la segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de aleación a base de níquel en un horno que funciona a de 927 °C (1.700 °F) a 1.066 °C (1.950 °F) durante un tiempo de horno de más de 2,0 horas.

7. El proceso de la reivindicación 1, en el que la segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de aleación a base de níquel en un horno que funciona a de 927 °C (1.700 °F) a 1.066 °C (1.950 °F) durante un tiempo de horno de 3,0 horas a 10,0 horas.

8. El proceso de la reivindicación 1, en el que la segunda etapa de calentamiento comprende calentar la pieza de trabajo de aleación a base de níquel en un horno que funciona a de 927 °C (1.700 °F) a 1.066 °C (1.950 °F) durante un tiempo de horno de 4,0 horas a 8,0 horas.

9. El proceso de la reivindicación 1, que comprende además:

fusión por inducción en vacío de materiales de alimentación para formar un lingote de la aleación a base de níquel; refusión del lingote de aleación a base de níquel para formar un lingote de aleación a base de níquel refinado, en donde la refusión comprende al menos una operación de refusión seleccionada del grupo que consiste en refusión por arco en vacío y refusión por electroescoria; y forjado en prensa del lingote de aleación a base de níquel refinado para formar la pieza de trabajo de aleación a base de níquel.

10. El proceso de la reivindicación 1, que comprende además, después de las dos etapas de calentamiento y de las dos etapas de trabajo:

el calentamiento de la pieza de trabajo de aleación a base de níquel a una temperatura de al menos 982 °C (1.800 °F), pero no mayor de una temperatura solvus del carburo $M_{23}C_6$ de aleación a base de níquel, durante al menos 3,0 horas de tiempo a esa temperatura; y

ES 2 656 207 T3

el enfriamiento rápido con agua de la pieza de trabajo.

11. El proceso de la reivindicación 1, que comprende además, después de las dos etapas de calentamiento y de las dos etapas de forja:

5 el envejecimiento de la pieza de trabajo de aleación a base de níquel a una temperatura de 704 °C (1.300 °F) a 760 °C (1.400 °F) durante un tiempo de al menos 3,0 horas a esa temperatura; y
el enfriamiento con aire de la pieza de trabajo a temperatura ambiente.

10

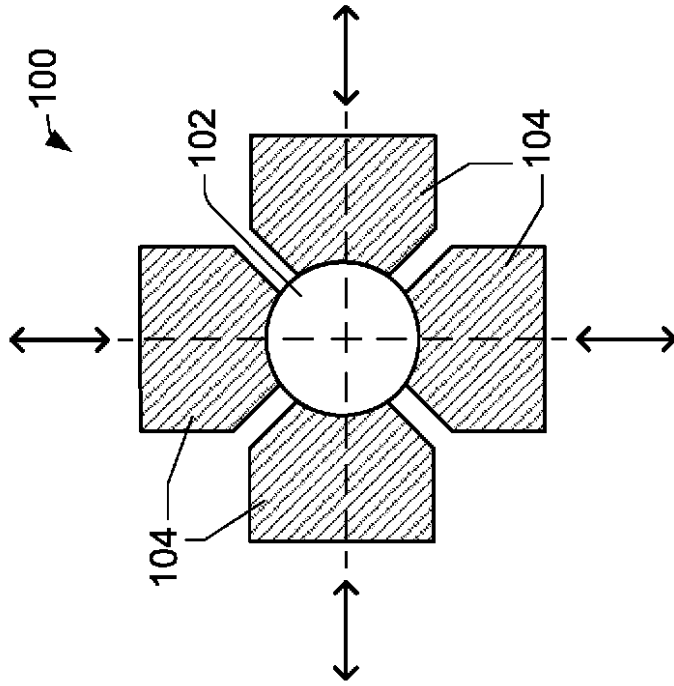


FIG. 1A

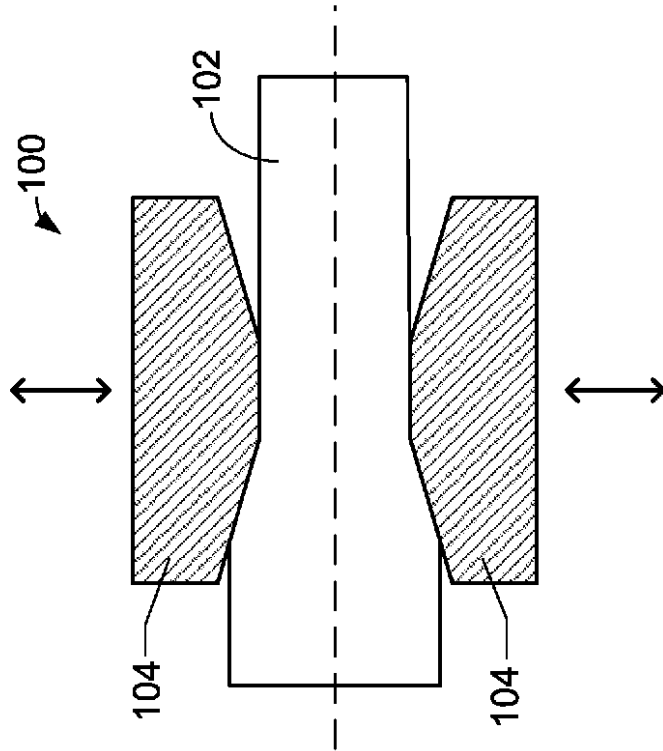


FIG. 1B

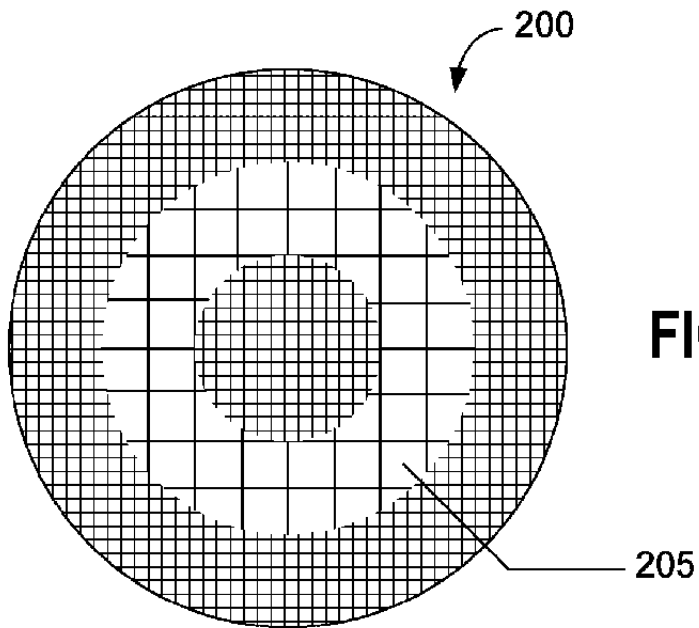


FIG. 2A

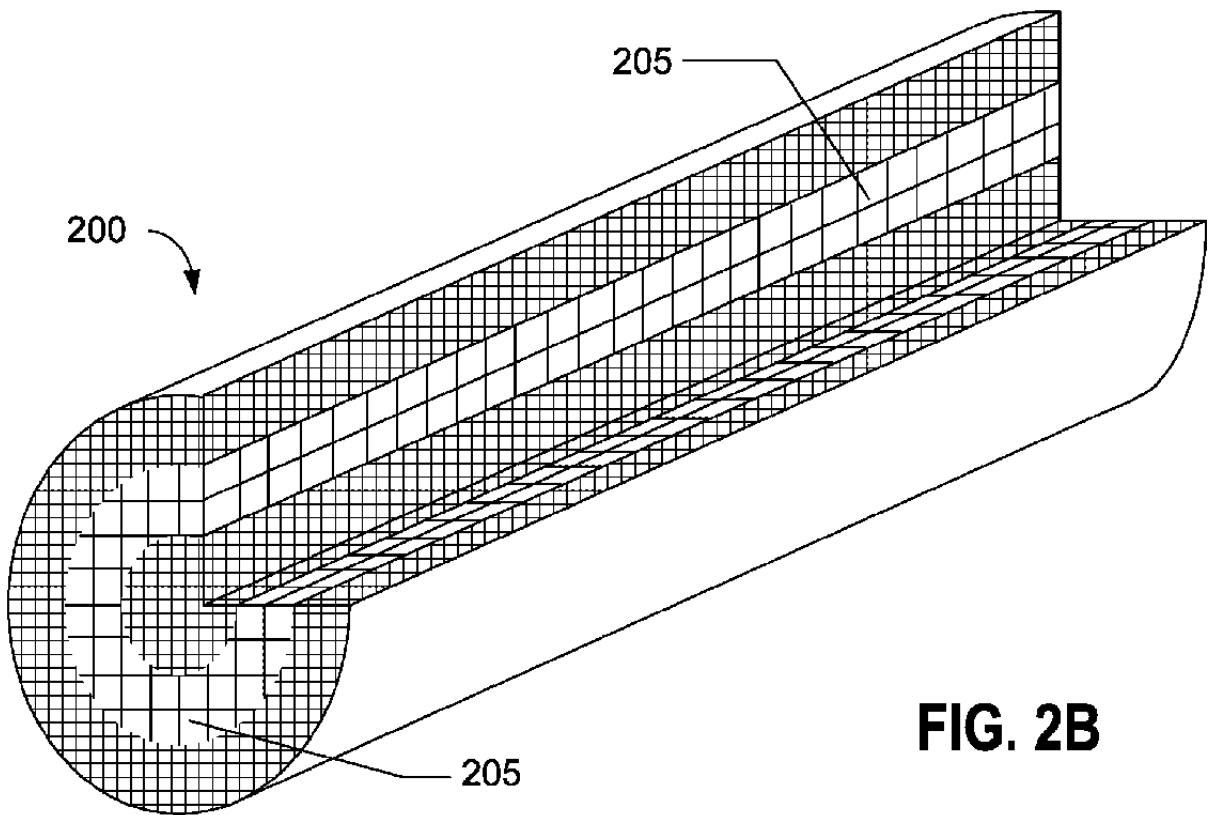


FIG. 2B

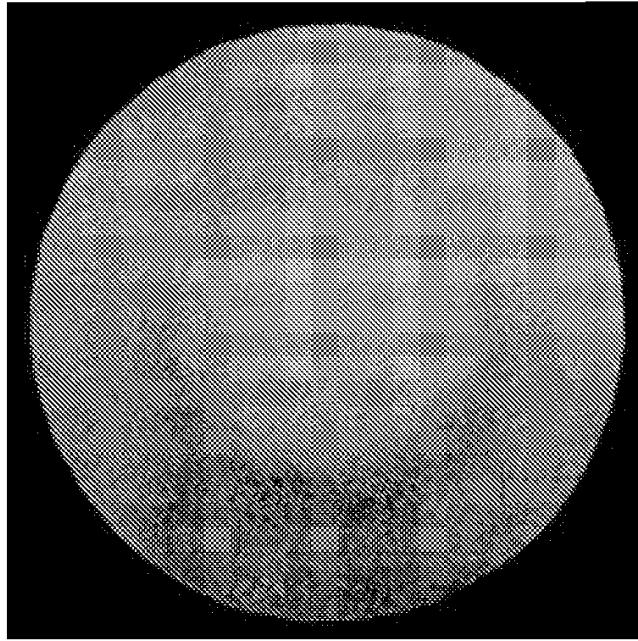


FIG. 3A

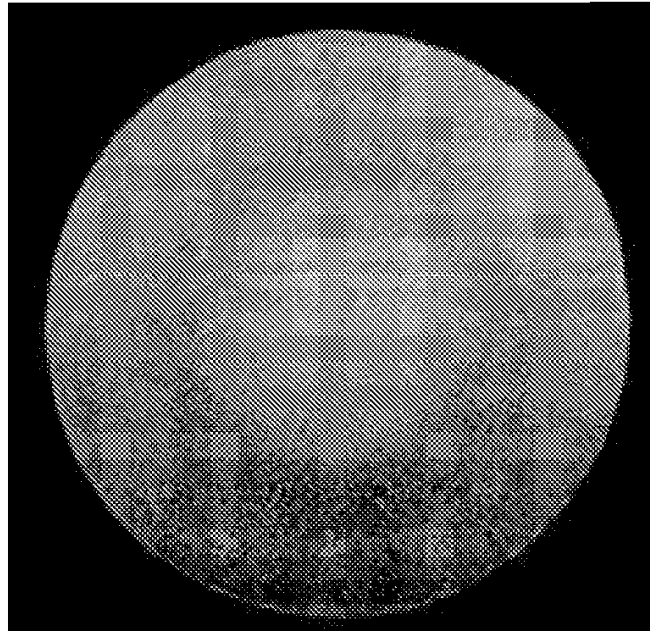


FIG. 3B

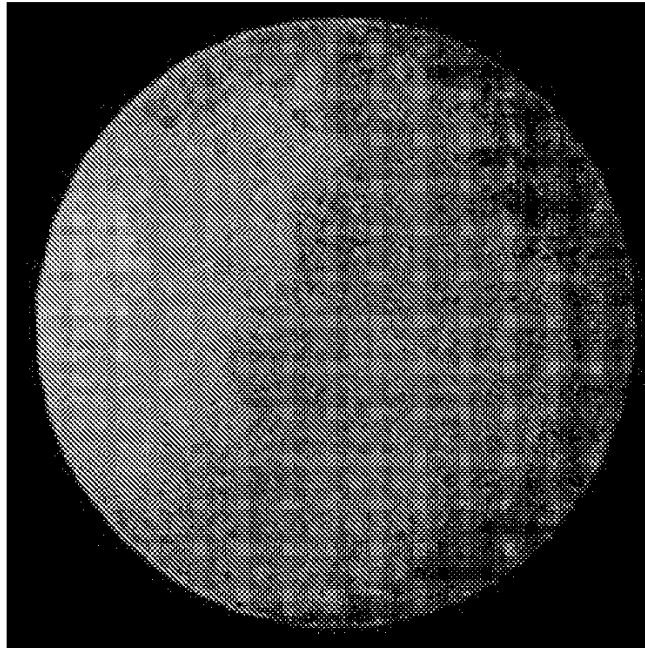


FIG. 3C

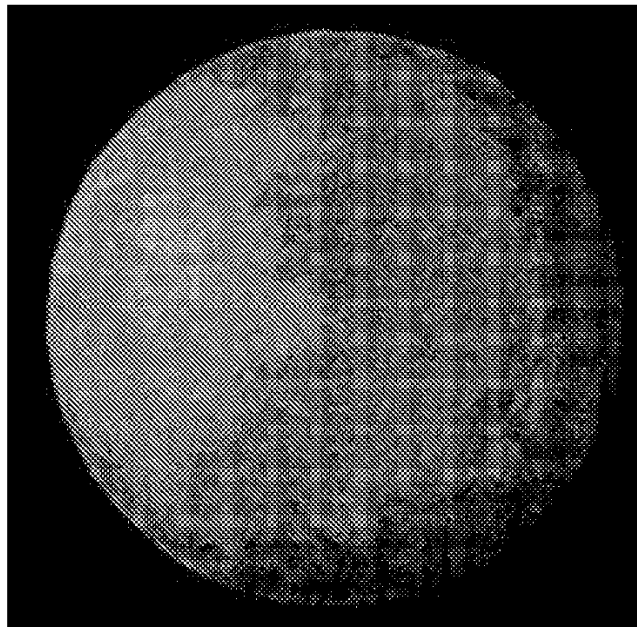


FIG. 3D