Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

"Análisis comparativo en cuanto a microestructura y propiedades mecánicas en la aleación Waspaloy de dos proveedores diferentes, para detectar un posible agrietamiento durante si procesado mecánico"

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencia de Materiales

PRESENTA

Ing. Alma Delia González Escárcega

DIRECTOR

Dr. Miguel Ángel Neri Flores

Chihuahua, chih., México a 23 de noviembre del 2012

Agradecimientos y Dedicatoria

Al centro de Investigación en Materiales Avanzados, sus laboratorios y su gente

Al consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología

A Frisa Forjados S.A. de C.V

Al Dr. Miguel Ángel Neri, mi asesor

Al Dr. Caleb Carreño Gallardo

A todos mis maestros por compartirme su tiempo y conocimiento.

A mi madre, por su comprensión y apoyo en la realización de este objetivo.

A toda mi familia y amigos

A Dios por acompañarme en cada momento

Y a todas las personas que de alguna manera ayudaron a la realización de este trabajo

Gracias

INDICE	PÁGINA
Justificación, hipótesis	1
Objetivo general, objetivos particulares	1
Introducción	2
Superaleaciones	2-3
Superaleaciones base níquel	3-4
Superaleaciones base cobalto	5
Superaleaciones base níquel-hierro	5
Aplicaciones en aeronáutica	6
Funcionamiento de Álabes de turbina	6
Capitulo 1. Waspaloy	7
1.1 Superaleacion Waspaloy	8
1.2 Efecto de la microestructura en las propiedades mecánicas de Waspaloy	8-9
1.3 Forja en superaleaciones	9
1.4 Proceso de fabricación de Waspaloy	9-13
1.6 Efecto de los elementos de aleación	15
Capitulo 2. Procedimiento experimental	16
2.1 Caracterización metalúrgica	17-18
2.2 Metalografía	18-19
2.3 Metalografía de Waspaloy	19
Capitulo 3. Resultados	20
3.1. Microscopía óptica	21
3.1.1 Material virgen Alvac	22
3.1.2 Material procesado Alvac	23
3.1.3 Material procesado Carpenter	24
3.1.4 Medición de tamaño de grano	25-27
3.2 Medición de dureza	28
3.2.1 Material virgen Alvac	29
3.2.2 Material procesado Alvac y Carpenter	30
3.3 Microscopía Electrónica de Barrido	31
3.3.1 Material virgen Alvac	32-33
3.3.2 Material procesado Alvac y Carpenter	34-35
3.3.3 Espectrometría por dispersión de energía (EDS)	36-37
3.4 Microscopia Electrónica de Transmisión	38
3.4.1 Material virgen Alvac	39
3.4.2 Material procesado Alvac y Carpenter	40-41
3.4.3 Espectrometría por dispersión de energía	42-43
3.5 Composición Química	44

3.5.1 Análisis químico ICP 45
3.5.2 Composición química del material virgen de Alvac 46
3.5.3 Composición química del material procesado de Alvac y carpenter 45-46
Análisis de Resultados 47-48
Conclusiones, recomendaciones 49-50
Referencias 51

Justificación:

Se presentaron problemas de agrietamiento en la aleación Waspaloy durante su procesamiento, al fabricar componentes resistentes a altas temperaturas, para motores aeronáuticos de reacción. El problema surge al cambiar de proveedor la compañía FRISA, ya que el Waspaloy del proveedor anterior no presentaba problemas de agrietamiento, y el material del nuevo proveedor si presento problemas de agrietamiento.

Hipótesis:

El problema del agrietamiento en el procesado termo-mecánico del Waspaloy se puede deber a que el tamaño de grano, y en general su microestructura, no sea homogéneo en toda la pieza, provocando que haya una deformación diferente en las zonas con tamaño de grano heterogéneo.

Objetivo general:

El objetivo de este trabajo es caracterizar metalúrgicamente la aleación Waspaloy de los proveedores Alvac y Carpenter, en cuanto a composición química, microestructura, por medio de microscopia óptica, microscopia electrónica de barrido, análisis EDS (Espectrometría por dispersión de energía), y microscopia electrónica de transmisión, para determinar si existen variaciones entre ambos materiales.

Las muestras procesadas de dos proveedores se analizaron para verificar si existen diferencias en cuanto a tamaño de grano, microestructura, dureza, análisis químico, para determinar si es la causa de agrietamiento en las piezas fabricadas en Frisa.

Objetivos particulares:

- Caracterización metalúrgica de la materia prima y material procesado de los dos proveedores.
- Comparar los resultados obtenidos en microscopia, análisis químico ICP, y dureza, de ambos proveedores y determinar si la causa de agrietamiento es debida al cambio de proveedor.

Introducción

Superaleaciones

Los materiales se eligen según los esfuerzos a que se someten y los rozamientos que soportan las piezas. A su vez los materiales pueden sufrir diversos tratamientos para conseguir características especiales.

Las superaleaciones se utilizan comúnmente en motores de turbinas de gas en regiones sujetas a altas temperaturas que requieren alta resistencia, excelente resistencia a la fluencia a alta temperatura, resistencia a la fatiga, estabilidad de fase, así como resistencia a la oxidación y corrosión.

Las superaleaciones desarrollar resistencia a altas temperaturas a través de fortalecimiento de solución sólida. Con mucho, el mecanismo de refuerzo más importante es a través de la formación de precipitados de fase secundaria tales como gamma prima y carburos a través del envejecimiento térmico. La oxidación y resistencia a la corrosión es proporcionada por la formación de un recubrimiento de barrera térmica (TBC), que se forma cuando el metal está expuesto al oxígeno y recubre el material, y así proteger el resto del componente. La oxidación o resistencia a la corrosión la proporciona elementos tales como el aluminio y el cromo.

Se denominan superaleaciones a un grupo de materiales de base níquel, níquel- hierro y cobalto que son utilizados a temperaturas de 540 °C y superiores. Las superaleaciones poseen elevada resistencia a altas temperaturas, resistencia al ataque del medio ambiente (incluyendo nitruración, carbonización, oxidación y sulfuración), excelente resistencia al creep, resistencia a la ruptura por estrés, estabilidad metalúrgica, características de expansión térmica muy útiles y resistencia a la fatiga térmica y a la corrosión. Las superaleaciones suelen tener una matriz austenítica, con una estructura cristalina cubica centrada en las caras.

El comienzo de los estudios sistemáticos de aleaciones de alta temperatura se produce a finales de la década de 1930 ligado al desarrollo de aviones con motores de turbina de gas. El desarrollo se ha basado en gran medida en innovaciones químicas y de proceso y ha sido impulsado principalmente por la industrias aeroespacial y de energía.

Las aplicaciones típicas son en el sector aeroespacial, de turbinas de gas industrial y la industria de turbinas marinas, por ejemplo, alabes para las secciones calientes de los motores a reacción, y válvulas bi-metálicos de motor para su uso en motores diesel y aplicaciones de automoción.
Ejemplos de superaleaciones son Hastelloy**,** Inconel (por ejemplo IN100, IN600, IN713), Waspaloy, aleaciones René (por ejemplo, René 41, René 80, 95 René, René N5), aleaciones de Haynes, Incoloy, MP98T, aleaciones de TMS, y CMSX (por ejemplo, CMSX -4) aleaciones monocristal.

Superaleaciones base níquel

En la década de los 50 del siglo XX, las compañías estadounidenses Pratt & Whitney y General Electric desarrollaron las aleaciones Waspaloy, y M-252 dopado con molibdeno. Y están destinados a los álabes de los motores de avión. Entonces las aleaciones fueron desarrolladas, tales como Hastelloy aleación X, René 41, Inconel, incluyendo Inconel 718, Incoloy 90.

Según los expertos, para en el período de los años 50 a los 80 la química de las superaleaciones de níquel ha cambiado significativamente por la introducción del aluminio y la sustitución de elementos en la fase γ'. Lo que ha provocado un aumento de la fracción de volumen de la fase γ' del 25 a 35% vol. en aleaciones como el Nimonic 80 y U-700 hasta 65 a 70% vol. en materiales de álabe modernos.

La resistencia a la fluencia depende de disminuir la velocidad de las dislocaciones en la estructura cristalina. En las superaleaciones con base Ni una fase gamma prima de [Ni_3(Al, Ti)] presente actúa como barrera al movimiento coherente de la dislocación y es un precipitado fortalecedor. La adición de sustancias tales como aluminio y titanio promueven la creación de la fase gamma prima. El tamaño de gamma fase principal se puede controlar con precisión mediante cuidadosos tratamientos térmicos para precipitar el fortalecedor. Muchas superaleaciones sufren dos tratamiento térmicos uno crea una dispersión de partículas gamma cuadrados prima conocidos como la fase primaria y el otro una dispersión fina entre estas conocida como gamma prima secundaria. Muchos otros elementos, tanto comunes como exóticas, (no sólo metales,

sino también metaloides y no metales) puede ser cromo, cobalto, molibdeno, wolframio, tántalo, aluminio, titanio, circonio, niobio, renio, carbono, boro o hafnio.

Las superaleaciones basadas en níquel, como regla general, poseen una composición química compleja. Incluye de 12 a 13 componentes cuidadosamente equilibrados para obtener las propiedades requeridas. El contenido de impurezas tales como silicio (Si), fósforo (P), azufre (S), oxígeno (O) y nitrógeno (N) también está controlado. El contenido de elementos tales como selenio (Se), teluro (Te), plomo (Pb) y bismuto (Bi), debe ser insignificante, siempre que la selección de materias primas con un contenido bajo de estos elementos, pues no es posible deshacerse de ellos durante la fusión. Estas aleaciones contienen normalmente de un 10 a 12% de cromo (Cr), hasta un 8% de aluminio (Al) y titanio (Ti), de 5 a 10% de cobalto (Co), así como pequeñas cantidades de boro (B), circonio (Zr) y carbono (C). A veces, el agregado de molibdeno (Mo), wolframio (W), niobio (Nb), tántalo (Ta) y hafnio (Hf).

En las superaleaciones basadas en el níquel, las fases se denominan gamma y gamma prima. Los cristales, diminutos y normalmente cúbicos, de la fase gamma prima se incrustan en una matriz formada por la fase gamma. La principal diferencia entre las dos fases radica en que los átomos en la gamma prima están mucho más ordenados que en la gamma.

Fase gamma: solución solida centrada en las caras que actúa como matriz.

Fase gamma prima: dispersión de precipitados ordenados intermetalicos, responsable de la gran resistencia de las superaleaciones. [1] Las formulas estequiometricas de esta fase son:

Ni_3Al, Ni_3Ti, o $Ni_3(Al, Ti)$

Donde la morfología del precipitado es debido al desajuste entre la matriz y el precipitado, la magnitud de desajuste se definen en función de los parámetros de red del precipitado y la matriz: los precipitaos esféricos generalmente se observan cuando el desajuste es menor que aproximadamente el 0.3%. Para desajustes más grandes de 0.3-1.0% los precipitados gamma prima asumen una morfología en forma de cubo. En aleaciones en las que el desajuste es mayor que el 1% se observan precipitados en forma de cubos. [2]

Dentro de estos nuevos materiales, se encuentran las superaleaciones de níquel mismas que presentan un buen comportamiento mecánico a temperaturas cercanas a los 1000°C. Estas aleaciones presentan una microestructura muy peculiar, que es la causante de sus excelentes propiedades, en donde se tiene una distribución en dos fases, gamma (γ) y gamma prima (γ´). La fase gamma es una solución sólida centrada en las caras que actúa como matriz, mientras que la fase gamma prima es una dispersión de precipitados ordenados del tipo intermetálico, responsables de la gran resistencia de las superaleaciones. Debido a sus propiedades, las aleaciones base 28 níquel son empleadas en aplicaciones donde se requiere resistencia mecánica a elevadas temperaturas como seria en la construcción de: álabes de turbinas, cámaras de combustión, reactores químicos, válvulas para motores de combustión interna, etc. Las superaleaciones de níquel, normalmente se fabrican mediante la fusión de una pieza de níquel y agregando a esta cierta cantidad de otros elementos metálicos, tales como Cr, Al, Ti ó Co, con los que se busca formar la fase gamma prima. Debido a que el contenido de los elementos de aleación es alto en este tipo de materiales y a las bajas solubilidades de estos elementos en el níquel cuando ocurre la solidificación, se tienen fuertes problemas de segregación de los elementos aleantes durante su enfriamiento. Recientemente, apareció una técnica de fabricación de este tipo de aleaciones; denominada solidificación rápida, gracias a la cual los metales fundidos se enfrían a muy altas velocidades evitando así en buena medida la segregación. Las superaleaciones así fabricadas tienden a ser bastante homogéneas y presentan alta resistencia mecánica. Sin embargo, este tipo de procesamiento es costoso y requiere equipo especial para llevarlo a cabo.

Entre las superaleaciones con base níquel las más empleadas están:

- Inconel: aleación de níquel con cromo y titanio.
- Hastelloy: aleación de níquel con molibdeno, hierro y cromo
- Nimonic: aleación de níquel con titanio.
- Waspaloy: aleación níquel con cromo y cobalto

Superaleaciones base cobalto

Las aleaciones de cobalto no gozan de la resistencia mecánica que disfrutan las superaleaciones de níquel, pero mantienen su resistencia a temperaturas mucho más elevadas. Su resistencia en estas condiciones se debe, principalmente, a la distribución de carburos refractarios (combinaciones de metales tales como el tungsteno y el molibdeno con el carbono), que tienden a precipitar en los límites de los granos de la aleación. La mejora de esta con la red de carburos se mantiene hasta temperaturas próximas a su punto de fusión.

Generalmente, las aleaciones de cobalto, además de llevar metales refractarios y carburos metálicos, contienen niveles elevados de cromo, lo que aumenta la resistencia a la corrosión provocada por la presencia de los calientes gases de combustión. Los átomos de cromo se combinan con los átomos de oxígeno y forman una capa protectora de óxido de cromo, que protege la aleación de los gases corrosivos: Las aleaciones de cobalto son más fáciles de soldar que las superaleaciones, ya que son menos duras; además, las superaleaciones son poco forjables, y pueden romperse bajo esfuerzos térmicos. Por todas esas razones, las aleaciones de cobalto se aplican para fabricar la intrincada estructura de la cámara de combustión, donde los componentes deben ser fabricables y soldables.

Superaleaciones base Níquel- Hierro

Las superaleaciones base hierro se emplean en la industria nuclear y aeroespacial, debido a su buen rendimiento mecánico a elevada temperatura. Su principal característica es la precipitación de la fase (γ´), la cual está constituida de $Ni_3(Al, Ti)$ que actúa como endurecedor de la matriz. Estas aleaciones tiene una desventaja, la inestabilidad del precipitado (γ´), el cual a temperaturas del orden de 730°C o superiores se descompone, dando lugar a la precipitación de la fase estable η, la cual degrada las buenas propiedades de la aleación.

Aplicaciones en aeronautica.

Debido a sus propiedades, las aleaciones base Níquel son empleadas para la construccion de turbinas de gas (álabes), turborreactores de avion, toberas y camaras de combustion, anillos para turbina de avion.

Funcionamiento de Álabes de Turbina

En un turborreactor, el objeto de las turbinas es transformar parte de la energía global del fluido, suma de las energías de presión, cinética e interna debida a la temperatura, en energía mecánica. Esta energía mecánica es la que ha de mover al compresor y a los accesorios. El resto de la energía cinética producirá el empuje en el motor al expulsar los gases a alta velocidad a través de la tobera.

La disminución de la resistencia de los metales cuando trabajan a elevadas temperaturas, como es el caso de los álabes de turbina y sus discos, exige la utilización de aleaciones especiales que ofrezcan alta resistencia a la termofluencia.

1 Waspaloy

1.1 Superaleacion Waspaloy

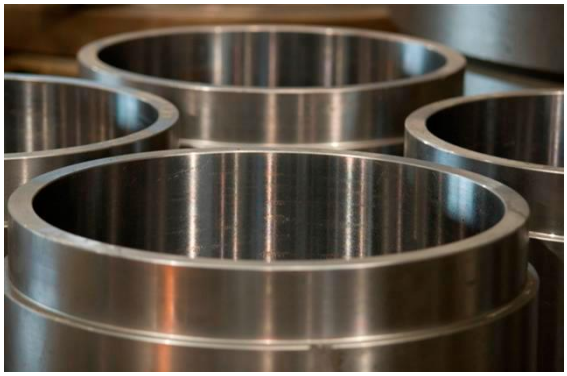
1.2 Efecto de la microestructura en las propiedades mecánicas de Waspaloy

1.3 Forja en superaleaciones

1.4 Proceso de fabricación de Waspaloy

1.5 Tratamientos térmicos de Waspaloy

1.6 Efecto de los elementos de aleación



1.1 Superaleacion Waspaloy

Waspaloy es una superaleacion usada para manufacturar partes aeronáuticas, sujetas a esfuerzos a altas temperaturas, teniendo buena resistencia al creep y fatiga. La fabricación de estos componentes consiste en una serie de pasos de un proceso termo-mecánico, con la finalidad de refinar la microestructura. Está compuesta de Níquel-Cromo-Cobalto, además se adicionan elementos como el Ti, Al, Co, Cr, que son los responsables de la formación de la fase gama prima, carburos gruesos y finos. En superaleaciones base níquel, la fase γ´ es Ni_3(Al, Ti). [1]

Con un tamaño de grano de ASTM de 10 a 14 se obtiene una buena resistencia a la tracción, ductilidad, y resistencia a la nucleación de grietas, pero presenta una baja resistencia a la fatiga. Una microestructura con un tamaño de grano de ASTM de 4 a 8 es requerido para una buena resistencia al creep y propagación de grieta. [3]

El objetivo del presente trabajo es la caracterización metalúrgica de Waspaloy incluido un análisis químico, microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido, análisis EDX, microscopio electrónico de transmisión, para determinar si los lingotes muestran un heterogeneidad en su microestructura y variaciones en la composición química (segregación), tamaño de grano y durezas.

1.2 Efecto de la microestructura en las propiedades mecánicas de Waspaloy.

Tamaño de grano: A menor tamaño de grano, mayor resistencia mecánica, pero disminuye la ductilidad, pues las dislocaciones tendrán menor movilidad al estar impedido su movimiento. Los límites de grano "anclan" las dislocaciones impidiendo su movimiento.[5] En el caso de Waspaloy que presenta bloques de carburos en las fronteras de grano existe una menor probabilidad de que una dislocación continúe propagándose. La aleación Waspaloy presenta carburos chicos ($M_{23}C_6$) y carburos grandes (MC_6) Si la microestructura presenta un tamaño de grano homogéneo, también tendrá buenas propiedades mecánicas, esto es debido a que en las zonas donde el tamaño de grano sea heterogéneo habrá una deformación diferente.

Las buenas propiedades mecánicas de Waspaloy son debido a la precipitación de la fase gamma prima, la cual está constituida de Ni_3 (Al, Ti). [8][1] Si la aleación presenta

una buena homogeneidad en su estructura cristalina entonces las propiedades aumentan significativamente. [9][10]

1.3 Forja en superaleaciones.

La forja es un proceso de conformado por deformación plástica que puede realizarse en caliente o en frío y en el que la deformación del material se produce por la aplicación de fuerzas de compresión**.**

Este proceso de fabricación se utiliza para dar una forma y unas propiedades determinadas a los metales y aleaciones a los que se aplica mediante grandes presiones. La deformación se puede realizar de dos formas diferentes: por presión, de forma continua utilizando prensas, o por impacto, de modo intermitente utilizando martillos pilones.

1.4 Proceso de fabricación de Waspaloy.

En la figura 1 se muestran los pasos del proceso de fabricación de los anillos forjados de Waspaloy.

Figura 1. Proceso de fabricación de anillos de Waspaloy

1.4.1 Materia prima

La materia prima para la fabricación de los anillos de Waspaloy llega en forma de lingotes como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Lingotes de Waspaloy.

1.4.2 Corte, horno de forja, prensa.

Los lingotes de Waspaloy son cortados de acuerdo a las dimensiones del anillo en proceso de fabricación**,** después de realizado el corte, estos cilindros son llevados a un horno para deformar en caliente con una prensa y seguida de un troquelado para dar la primer forma al anillo.

1.4.3 Proceso de Forja y rolado.

Las temperaturas del proceso de forja en los anillos fue de: 1200-1100°

Rolado: 1100-1000 °C

Figura 3. Anillos de Waspaloy en proceso de forja y rolado.

1.4.4Tratamientos térmicos de Waspaloy.

Solubilizado: 1050-1000 °C/ 4 Hrs/enfriado en aceite sintético.
Envejecido 1: 875- 850°C/4 hrs/aire
Envejecido 2: 780-750°C/ 16 hrs/ aire

1.4.4.1 Solubilizado:

El tratamiento térmico de la solución (solubilización): El objeto de esta etapa, es disolver un máximo de la segunda fase en la solución sólida y después, retener esta solución hasta alcanzar la temperatura ambiente. Esto se efectúa así:

-Calentando la aleación en un rango de 1050-1000°C, evitando un crecimiento excesivo de grano o la fusión de uno de los constituyentes.

-Manteniendo esta temperatura durante 4 horas, y es enfriada en aceite sintético. La temperatura dependerá del espesor de la pieza para que pueda producirse la solución.

1.4.4.2 Envejecimiento.

Sólo hay dos métodos principales para aumentar la resistencia y la dureza de una aleación dada: trabajo en frío o tratamiento térmico. El proceso de tratamiento térmico más importante para aleaciones no ferrosas es el de endurecido por envejecimiento o por precipitación.

Objetivos del envejecimiento:

-Aumentar la resistencia de la aleación.

-Crear, en una aleación tratada térmicamente, una dispersión densa y fina de partículas precipitadas en una matriz de metal deformable. Las partículas precipitadas actúan como obstáculos del movimiento de las dislocaciones y, así, refuerzan la aleación tratada térmicamente.

Para aplicar este tratamiento térmico, el diagrama de equilibrio debe mostrar solubilidad sólida parcial, y la pendiente de la línea de solvus debe ser tal que haya mayor solubilidad a una temperatura mayor que a una menor.

La condición necesaria para que se produzca la precipitación en una solución sólida es, sencillamente, la existencia de una línea de solvus. Por consiguiente, se produce cierto grado de precipitación en la mayor parte de los sistemas de aleación y un grado notable en cientos de casos conocidos.

Efecto del tiempo de envejecimiento sobre las propiedades mecánicas.

A medida que se incrementa el tiempo de envejecimiento, se van formando las zonas de precipitación y su tamaño se incrementa; además, la aleación se hace más fuerte, dura y menos dúctil. Estas propiedades mecánicas alcanzan un valor máximo durante la precipitación a una temperatura dada y, después, disminuyen gradualmente como consecuencia del sobreenvejecimiento. [8]

1.4.5 Maquinado

En esta etapa del proceso es donde se da la forma al anillo, como se observa en la figura 4.

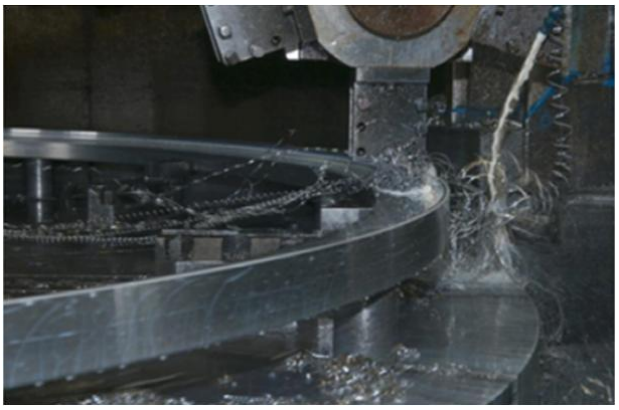


Figura 4. Anillo de Waspaloy en proceso de maquinado.

1.4.6 Laboratorio

Los anillos terminados de Waspaloy se pasan a un laboratorio, donde se realizan pruebas con líquidos penetrantes con luz fluorescente, para determinar grietas superficiales.

Figura 5. Anillo de Waspaloy en pruebas de laboratorio.

1.4.7 Logística

Los anillos de Waspaloy son almacenados o transportados al cliente.

Figura 6. Anillos de Waspaloy terminados.

1.5 Efecto de los elementos de aleación.

Las aleaciones de base Níquel proporcionan excelentes propiedades mecánicas que van desde temperaturas de congelación hasta temperaturas que exceden los 1000ºC.

Cromo:

Es agregado al Níquel para realzar su fuerza, resistencia a la corrosión, oxidación, resistencia a la corrosión en caliente y resistividad eléctrica.

Aluminio:

Proporciona la formación superficial de Al_2O_3, y es empleado para la precipitación de la fase γ` Ni_3(Al, Ti) para la consolidación coherente de la partícula.

Titanio:

Es agregado para la formación de la fase γ`.

Cobalto:

Generalmente presente en muchas superaleaciones en una cantidad mayor al 10% en peso, realza la fuerza, la resistencia a la corrosión en caliente, y oxidación, la cual también proviene del Cromo en la aleación.

Carbón:

Esta generalmente presente en las superaleaciones por la precipitación intencional de carburo en los límites del grano, la cual como partículas discretas y equiaxiales, pueden proporcionar barreras para el desplazamiento y el movimiento del límite de grano. [6]

2 Procedimiento Experimental

2.1 Caracterización metalúrgica

2.2 Metalografía

2.3 Metalografía de Waspaloy

2.1 Caracterización metalúrgica.

La caracterización metalúrgica de las muestras consiste en: una determinación de la composición química por análisis ICP, una determinación de la microestructura por microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido, análisis EDS (Espectrometría por dispersión de energía), microscopio electrónico de transmisión, mediciones de tamaño de grano por análisis de imagen (Image Pro Plus), y mediciones de dureza en Rockwell “C”. El material usado en el presente trabajo fue una barra de Waspaloy de 304.8 mm de diámetro rolada en caliente

La barra recibida del material virgen de Waspaloy, fue examinada en seis sitios representativos, una en el diámetro externo, 4 en el medio, y una en el centro.

La figura 5 muestra la manera en la cual fue cortada la pieza de Waspaloy, y la posición de las 6 mediciones del material virgen de Alvac.

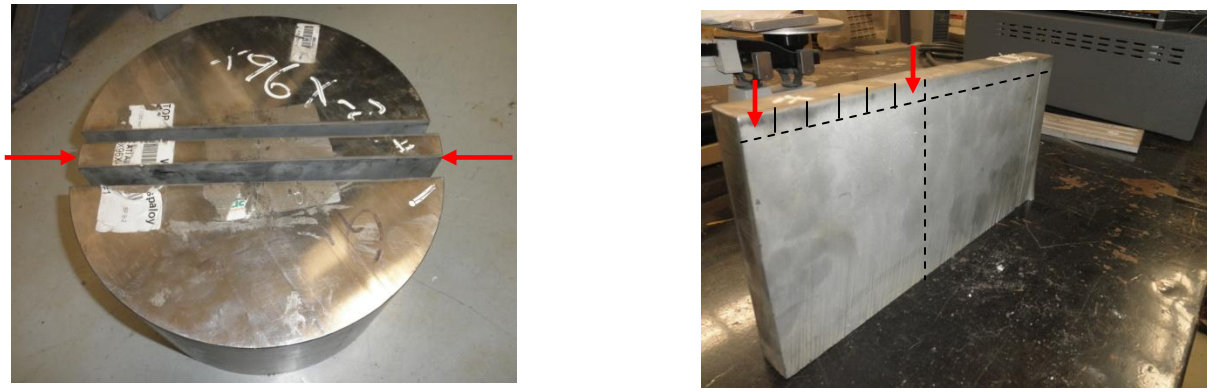


Figura 7. Localización de las 6 muestras obtenidas del lingote de Waspaloy del material virgen de Alvac.

Material procesado de Alvac y Carpenter:

El corte de las muestras se realizó como lo indica la figura 6, las muestras fueron pulidas en las caras donde indican las flechas.

Figura 8. Localización de las 6 muestras obtenidas del material procesado de Waspaloy de Alvac y Carpenter.

Después del corte, se realizo la caracterización metalografica, que consiste en realizar un estudio de la microestructura del material, además que una vez realizada conoceremos ciertas características del material, como lo es: el tamaño de grano, limite de grano, la fase o fases características de la aleación, etc.

2.2 Metalografía

1. **Corte del material.** La orientación de la superficie a examinar es de suma importancia, ya que de acuerdo al corte que se realice sobre el material, la estructura se podrá observar de diferente manera. El método para cortar debe ser aquel que minimice la deformación y el calentamiento del área de corte, ya que en ambos casos este podría afectar la superficie que se examina.
2. **Esmerilado.** El esmerilado se realiza para remover todo el material o imperfecciones que quedan sobre el corte, esto con el fin de dejar un área totalmente plana, además se usa una serie de lijas para complementar esta operación, llamado desbaste grueso y siempre utilizando agua como refrigerante sobre el material, con el fin de evitar algún cambio en la microestructura del material debido al calor.

3. **Pulido.** La pieza a analizar debe de contar con un acabado superficial excelente (acabado espejo), esto se logra mediante la utilización de un abrasivo, lo cual se coloca frente a un disco rotatorio cubierto de un paño y ejerciendo la presión correcta entre la pieza y el paño se logra el acabado deseado.
4. **Ataque del material.** El ataque del material consiste en utilizar un agente químico que reaccione con la superficie a examinar, este es el paso de mayor importancia durante la metalografía, ya que si el agente no es el indicado no se podrán observar las características deseadas sobre la pieza.

2.3 Metalografía de Waspaloy

a) El corte del material se realizo en una cortadora de precisión con disco diamantado LECO VC-50, que cuenta con sistema de enfriamiento, se realizaron 6 cortes para el material virgen de Alvac, del material procesado se tomaron 3 de Alvac, 3 de Carpenter, como se muestra en las imágenes 7 y 8.

b) Se realizo un esmerilado para retirar el exceso de material producido por el corte, se utilizaron lijas de 180 a 1500 para delimitar una superficie plana a lo largo de los cortes y facilitar el estudio.

c) Realizado lo anterior se pulieron las muestras en una desbastadora/pulidora.

d) Una vez que se logro el acabado espejo se ataco el material con (gliceregia en una concentración de 10 cm_3 HNO_3, 20 cm_3 HCl, 20 cm_3 glicerina), este agente químico es recomendable para atacar la aleación Waspaloy. [7]

e) Después se analizaron las superficies en un microscopio óptico OLYMPUS-PMG 3, microscopio electrónico de barrido JSM-5800LV, microscopio electrónico de transmisión JEM-2200FS, en varias condiciones de graduación óptica y se observo la formación de carburos, fases presentes (γ y γ´), defectos internos, tamaño de grano, y carburos precipitados en los límites de grano.

f) Por último se realizaron pruebas de dureza para saber la homogeneidad de esta en las muestras, realizadas en un durómetro INSTRON Rockwell C.

Las muestras fueron preparadas para obtener la micrografía, la cual nos muestra tamaño de grano, morfología de grano, distribución de grano, y fases presentes en la matriz.

3 Resultados

3.1 Microscopía óptica.

3.2 Medición de dureza.

3.3 Microscopía Electrónica de Barrido.

3.4 Microscopía Electrónica de Transmisión.

3.5 Composición Química.

3.1 Microscopía Óptica

3.1.1 Material virgen Alvac

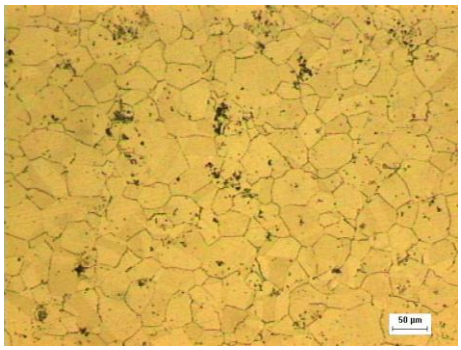
3.1.2 Material procesado Alvac

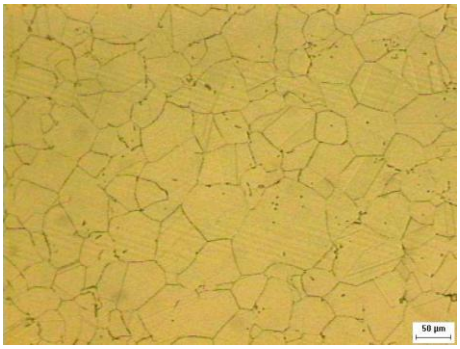
3.1.3 Material procesado Carpenter

3.1.4 Medición de tamaño de grano

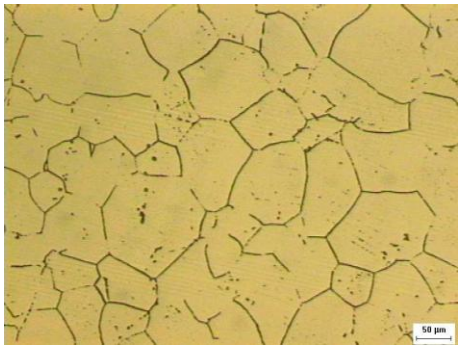
3.1.1 Material virgen Alvac

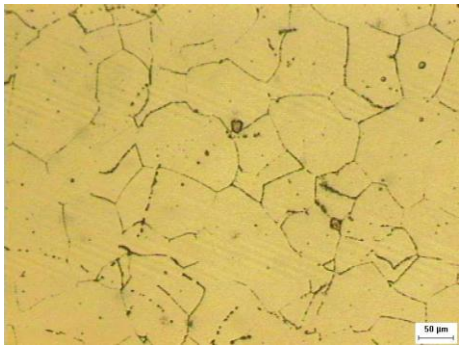
Se utilizo un microscopio óptico OLYMPUS-PMG 3 y se observo la diferencia de tamaño de grano de la muestra 1 (centro del lingote), apreciándose un tamaño de grano grande en comparación con la muestra 6 (orilla del lingote). También se observa un cambio de fase debido a los precipitados gamma prima.



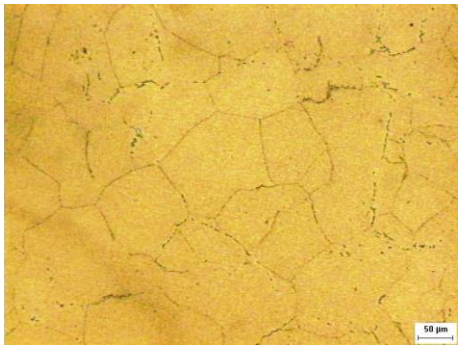


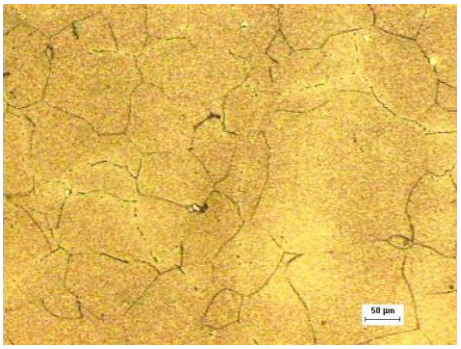
M-1 Superficie externa del lingote M-2





M-3 M-4



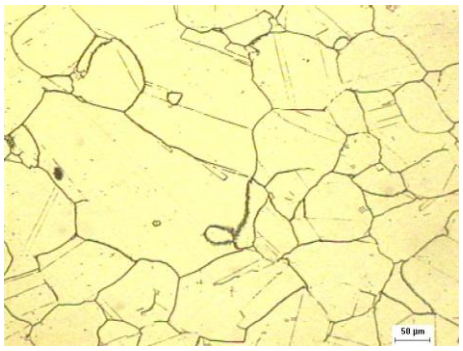


M-5 Centro del lingote M-6

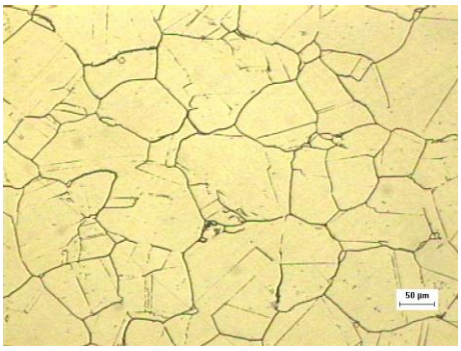
Figura 9. Microestructuras del material virgen de Alvac.

3.1.2 Material procesado Alvac:

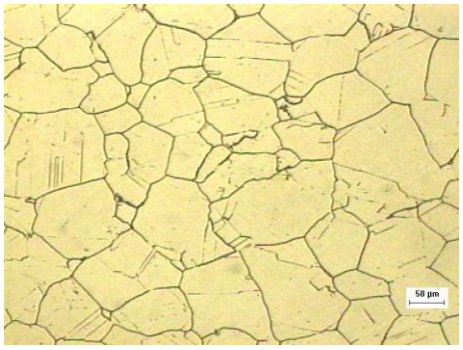
Microscopio óptico



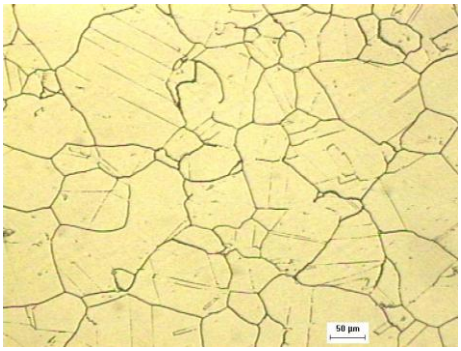
M-2A 1



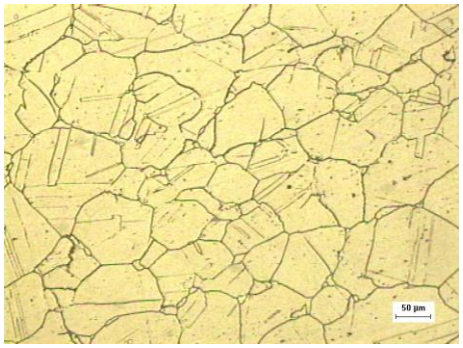
M-2A 2



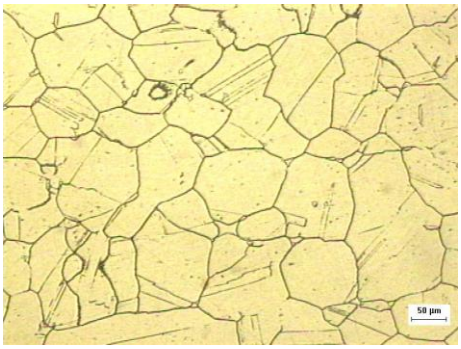
M-2A 4



M-2A 5



M-3A 2

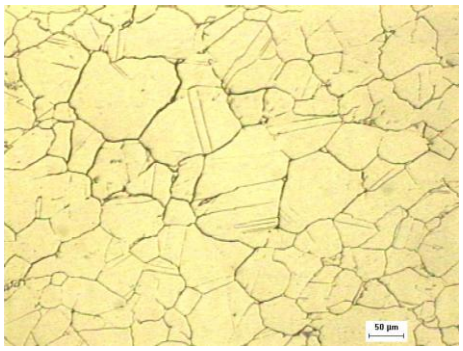


M-3A 4

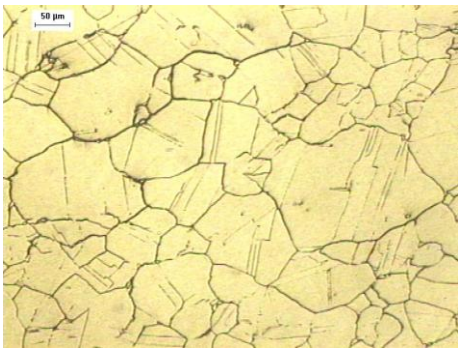
Figura 10. Microestructuras del material procesado de Alvac.

3.1.3 Material procesado Carpenter:

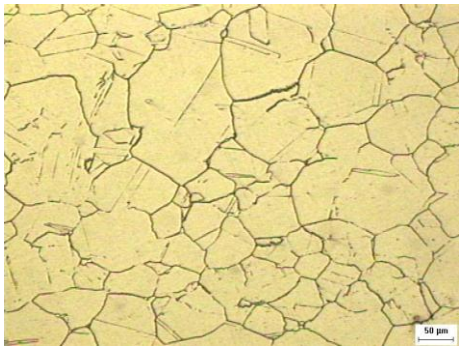
Microscopio óptico



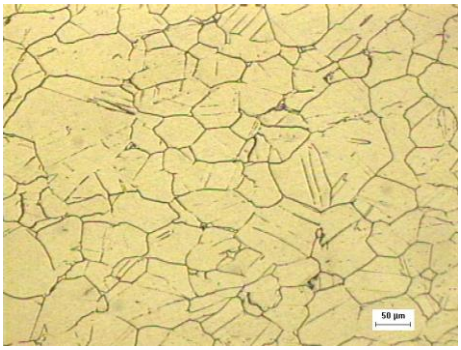
Muestra 1C 1



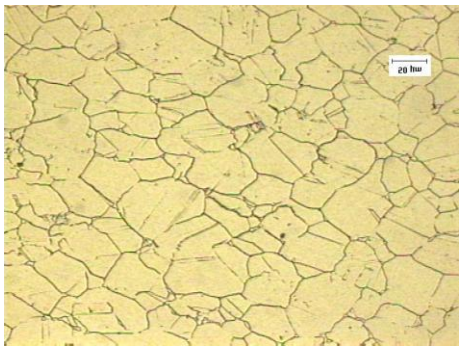
Muestra 1C 5



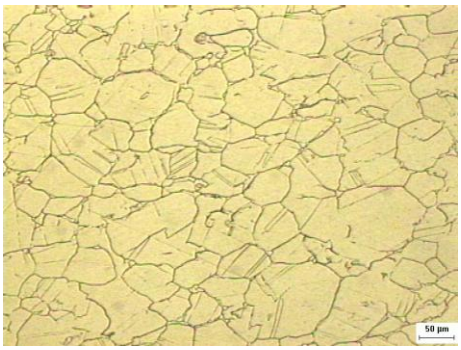
Muestra 3C 1



Muestra 3C 2



Muestra 3C 3



Muestra 3C 4

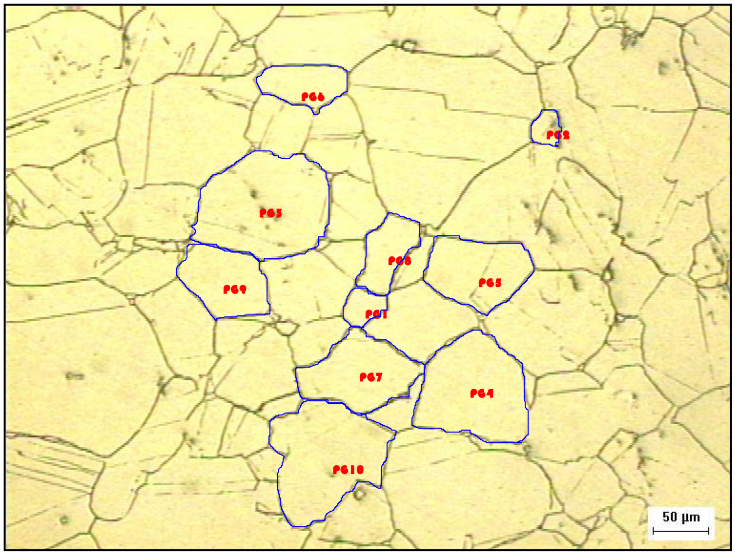
Figura 11. Microestructuras del material procesado de Carpenter.

3.1.4 Medición de tamaño de grano

Las mediciones de tamaño de grano se realizaron en un analizador de imágenes Image pro plus de la siguiente manera:

Se tomaron mediciones de las 6 muestras del material virgen de Alvac, de las 3 muestras del material procesado de Carpenter, y de las 3 muestras del material procesado de Alvac.

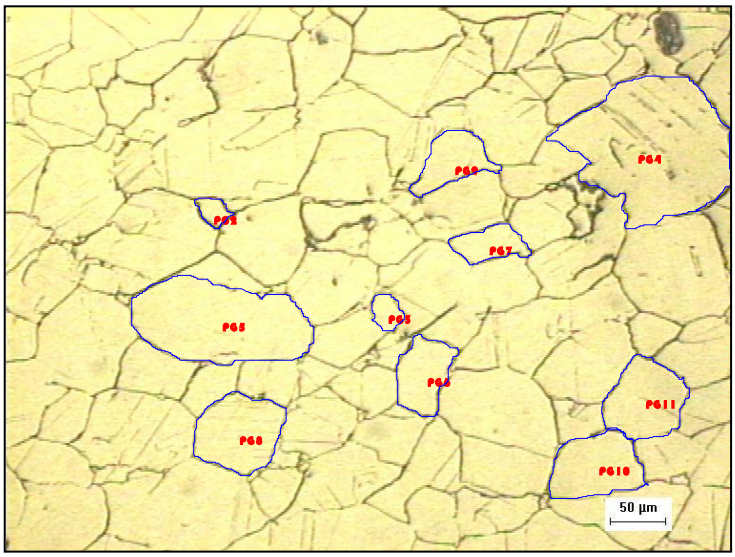
En el microscopio óptico OLYMPUS-PMG 3 se tomaron 5 fotografias de cada una de las muestras del material virgen y procesado, de cada fotografía se realizaron 10 mediciones de área de grano y se consiguió un promedio en micras por fotografía, después se continuo con cada una de las micrografías y finalmente se obtuvo un promedio final de los dos proveedores en el material procesado como se muestra a continuación:



Muestra-1Alvac-5 100X

Numero de medición	Área de medición	Medida	Valor
1	PG1	Área	1,047.86
2	PG2	Área	739.44
3	PG3	Área	9,689.35
4	PG4	Área	7,964.47
5	PG5	Área	5,019.32
6	PG6	Área	2,625.59
7	PG7	Área	5,596.76
8	PG8	Área	2,559.45
9	PG9	Área	4,211.5
10	PG10	Área	8,777.49
Promedio			4823.12

Figura 12. Mediciones realizadas en el analizador de imágenes Image Pro Plus de una muestra de Alvac tomada a 100X



Numero de medición	Área de medición	Medida	Valor
1	PG1	Área	627.22
2	PG2	Área	758.76
3	PG3	Área	14,906.36
4	PG4	Área	10,015.61
5	PG5	Área	2,836.65
6	PG6	Área	1,760.55
7	PG7	Área	4,655.91
8	PG8	Área	2,621.87
9	PG9	Área	4,150.56
10	PG10	Área	4,301.42
Promedio			4,663.49

Muestra-1Carpenter-3 100X

Figura 13. Mediciones realizadas en el analizador de imágenes Image Pro Plus de una muestra de Carpenter tomada a 100X

Según la norma ASTM-E112-96, microestructuras con un tamaño de grano de 10 a 14 es bueno para tener una buena resistencia a la tensión, ductilidad y resistencia a la nucleacion de grietas en fatiga de bajo ciclaje.

Un tamaño de 4 a 8 es requerido para una buena resistencia al creep y propagación de grietas. [3]

En piezas forjadas generalmente se obtienen tamaños de grano entre 4 y 6. [11][4]

Tabla I. Promedio de área de grano y tamaño de grano ASTM evaluado en las muestras de Waspaloy de Alvac del material virgen.

Muestra	Promedio de área de grano (μm^2)	Tamaño de grano ASTM
1	1477.74	6.5
2	1899.05	6.5-6.0
3	2681.35	6.0-5.5
4	3371.07	5.5-5.0
5	5469.33	5.0-4.5
6	7288.24	4.5-4.0

Tabla II. Promedio de área de grano y tamaño de grano ASTM evaluado en las muestras de Waspaloy de Alvac y Carpenter del material procesado.

Muestras Alvac	**Promedio de área de grano(μm^2)**	**Tamaño de grano ASTM**
1	6415.05	4.0-4.5
2	7349.90	4.0-4.5
3	5938.18	4.5
PROMEDIO ALVAC	6567.04	4.0-4.5
Muestras Carpenter		
1	4901.01	4.5-5.0
2	3953.52	5.0
3	4537.69	4.5-5.0
PROMEDIO CARPENTER	4464.07	4.5-5.0

Tabla III. Numero de tamaño de grano según la norma ASTM-E112-96

E 112

TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{\ell}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$
	No./in.^{2} at 100X	No./mm^2 at 1X	mm^2	μm^2	mm	µm	mm	µm	No./mm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5	2.21
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0	3.12
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1	3.72
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3	4.42
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3	5.26
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0	6.25
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5	7.43
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1	8.84
[illegible]	5.66	87.68	0.0114	[illegible]	0.1068	106.8	0.0951	95.1	10.51
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
[illegible]	22.63	350.73	0.00285	[illegible]	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

3.2 Medición de Dureza

3.2.1 Material virgen Alvac

3.2.2 Material procesado Alvac y Carpenter

3.2.1 Material virgen Alvac

Se utilizó un durómetro INSTRON en Rockwell C. La muestra 1 (orilla del lingote) presentó una dureza mayor en comparación con la muestra 6 (centro del lingote)

Tabla IV. Promedio de durezas Rockwell C en las muestras de Waspaloy del material virgen de Alvac.

Muestra	**M1**	**M2**	**M3**	**M4**	**M5**	**M6**
Durezas Rockwell "C"	37	30.7	30	27.5	28	23
	36	32	29.8	26.5	26.2	24.5
	36	31.8	29	26.5	25	25
	35	32	29.4	25.5	25.8	25
	35	32	28.8	27.0	25.0	24
	35	31.5	28	25.3	25.0	25
	35	31	27	26	26.0	25
	34	31	27.3	25.5	24.8	25.5
	34	29	26	26	28.0	25
Promedio	**35.22**	**31.22**	**28.36**	**26.2**	**25.97**	**24.66**

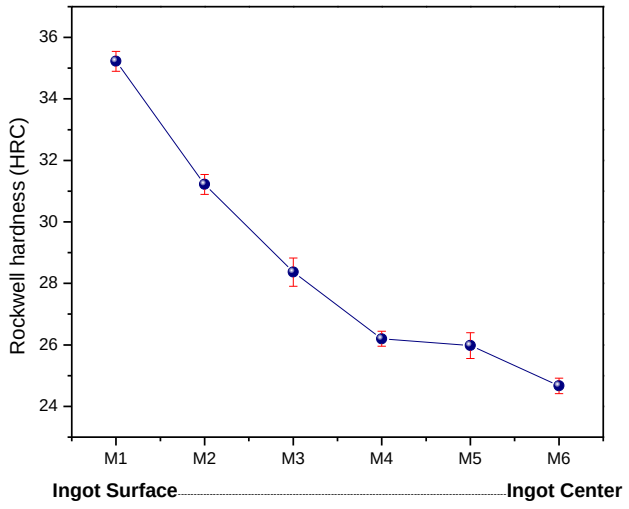


Figura 14. Promedio de durezas Rockwell C medidas en las muestras del lingote de Waspaloy (material virgen).

3.2.2 Material procesado Alvac y Carpenter

Tabla V. Promedio de durezas Rockwell C de las muestras de Waspaloy del material procesado de Alvac y Carpenter.

Muestra	Alvac 1ª	Alvac 3ª	Carpenter 1C	Carpenter 3C
Dureza RC	34	36	37	36.5
	33.5	38	34	39
	35	37.5	36	38
	35	37.5	36	38
	35	37.5	36	37
Promedio	**34.5**	**37.3**	**35.8**	**37.7**
	Promedio Alvac	**35.9**	**Promedio Carpenter**	**36.75**

Según la hoja técnica de Carpenter la dureza de la aleación debe estar dentro del límite 36-37 con un Tratamiento térmico de solubilizado 1050°C/4Hrs/Enfriado en polímero, Envejecido 1: 843°C/4Hrs/Enfriado aire
Envejecido 2: 760°C/16 Hrs/ Enfriado aire

Existe una variación en la dureza del material procesado en cuanto al material virgen de las muestras de Alvac, esta diferencia, es debida a los tratamientos a los cuales fue sometido el material.

3.3 Microscopía Electrónica de Barrido

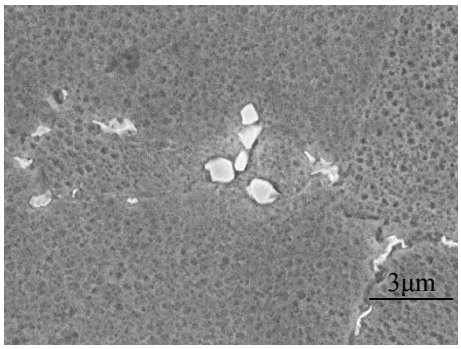
3.3.1 Material Virgen Alvac

3.3.2 Material procesado Alvac y Carpenter

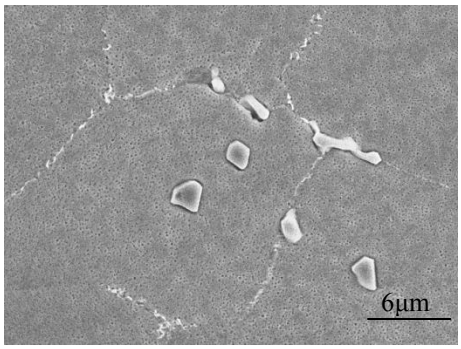
3.3.3 Espectrometría por dispersión de energía

3.3.1 Material Virgen Alvac

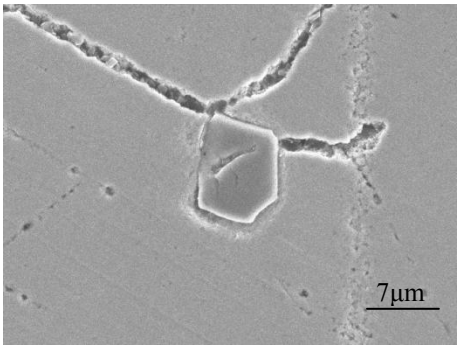
Las muestras fueron observadas por un Microscopio Electrónico de Barrido JSM-5800LV. En campo claro, por electrones secundarios.



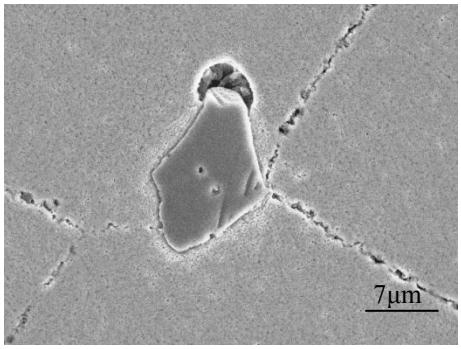
Muestra 1



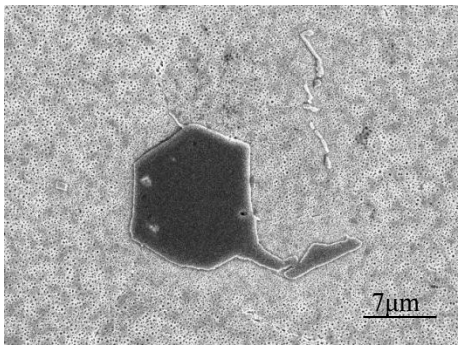
Muestra 2



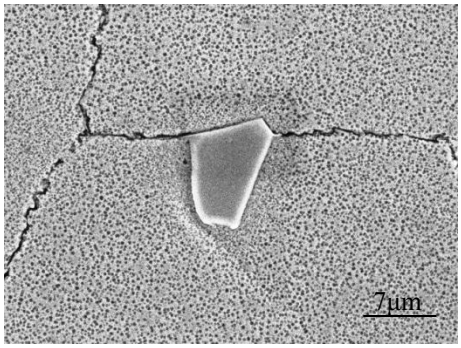
Muestra 3



Muestra 4



Muestra 5



Muestra 6

Figura 15. Fotografías tomadas en el Microscopio Electrónico de barrido de las 6 muestras obtenidas del lingote de Waspaloy, del material virgen de Alvac, que muestran carburos gruesos de Mo y Ti, y carburos localizados en los límites de grano.

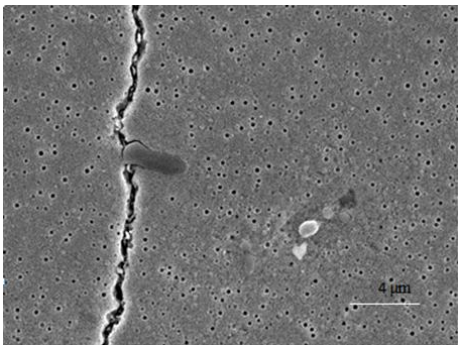
En la microestructura se observó la presencia de carburos en los límites de grano y dentro de los granos. Por medio de un análisis EDS se determino que los bloques de carburos en las fronteras de grano son de Mo, Ti y Cr, los carburos localizados dentro de los granos corresponden a Ti y Mo. Este análisis también fue útil para determinar las fases presentes en la matriz.

Se realizo un análisis EDS para identificar la composición de los carburos presentes en la microestructura del lingote de Waspaloy. Los carburos del límite de grano contienen carbón, molibdeno, titanio y cromo. Los carburos gruesos contienen carbón, molibdeno, y titanio, mostrado en la tabla VI.

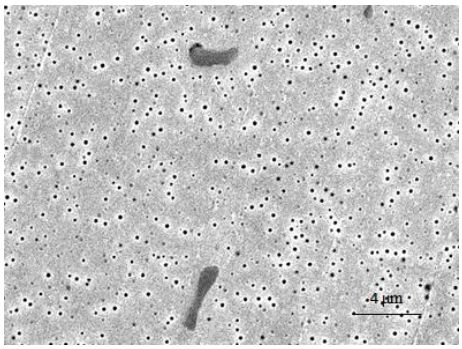
Tabla VI. Elementos detectados en los carburos gruesos, carburos en los límites de grano y matriz.

Muestra	**C**	**Al**	**Mo**	**Ti**	**Cr**	**Fe**	**Co**	**Ni**
M1 Carburos gruesos	**13.46**	2.27	6.21	3.35	**18.25**	1.15	11.10	44.21
M2 Carburos gruesos	**23.50**	--	**21.04**	**51.17**	**1.62**	--	--	2.66
M3 Carburos gruesos	**6.59**	--	--	**93.41**	**--**	--	--	--
M4 Carburos gruesos	**19.17**	--	6.24	**74.60**	**--**	--	--	--
M5 Carburos gruesos	**7.56**	--	--	**92.44**	**--**	--	--	--
M6 Carburos gruesos	**19.33**	--	9.94	**60.79**	**2.62**	--	2.01	5.31
M1 Carburos en los límites de grano	**14.82**	1.03	4.60	2.55	**19.91**	1.23	**11.94**	43.91
M2 Carburos en los límites de grano	**24.85**	--	**17.04**	**36.63**	**5.96**	--	3.22	12.30
M3 Carburos en los límites de grano	**26.69**	0.43	**18.75**	**37.23**	**4.27**	0.54	2.56	9.53
M4 Carburos en los límites de grano	**23.82**	--	**18.90**	**45.26**	**3.20**	--	2.19	6.64
M5 Carburos en los límites de grano	**17.63**	0.66	**14.24**	**24.52**	**10.58**	1.17	6.59	24.61
M6 Carburos en los límites de grano	**22.26**	0.57	**16.96**	**35.78**	**5.62**	1.15	3.93	13.72
M1 matriz	**3.32**	1.27	4.40	3.01	**18.17**	1.35	**13.54**	**54.96**
M2 matriz	**3.34**	1.04	4.50	2.72	**18.61**	1.39	**13.53**	**54.89**
M3 matriz	**3.85**	1.30	4.40	3.05	**18.32**	1.27	**13.54**	**54.28**
M4 matriz	**3.93**	1.21	4.54	2.59	**18.35**	1.28	**13.76**	**54.35**
M5 matriz	**3.05**	1.34	4.42	2.76	**19.18**	1.46	**13.29**	**54.50**
M6 matriz	**9.52**	1.28	3.58	2.65	**17.14**	1.23	**12.99**	**51.61**

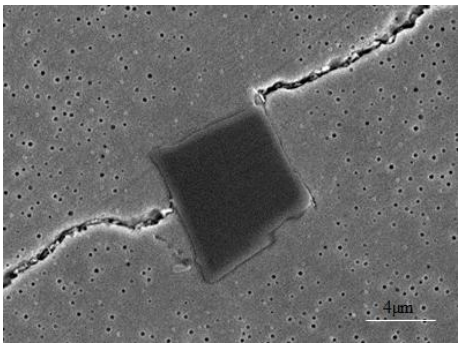
3.3.2 Material procesado Alvac y Carpenter



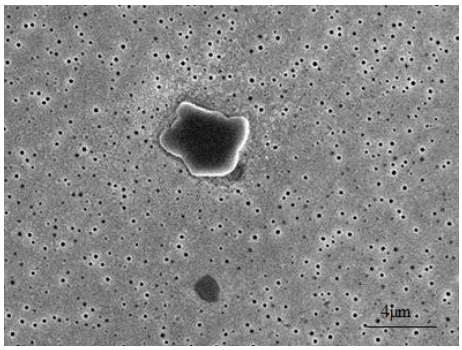
M1Alvac CCH1



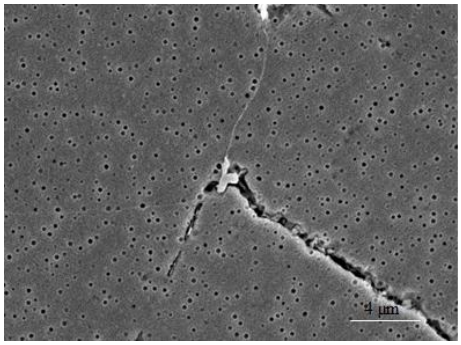
M1 Carpenter CCH4



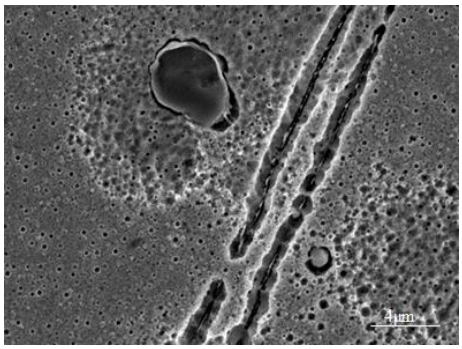
M 2 Alvac CG1



M 1 Carpenter CG1



M 2 Alvac CCH1

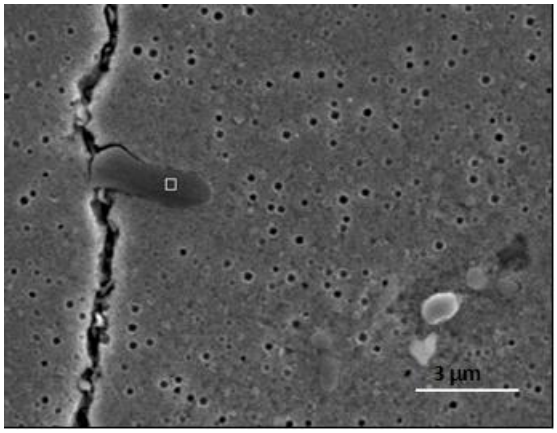


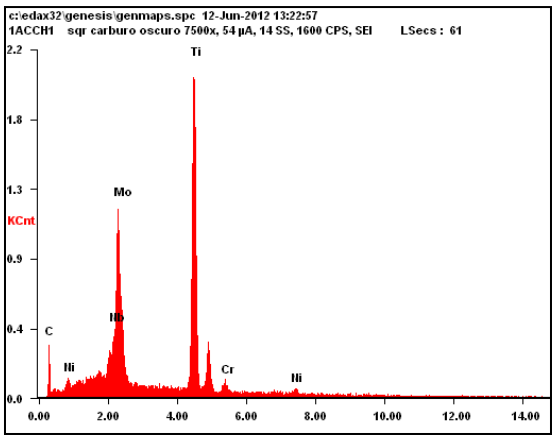
M 2 Carpenter CG y CH1

Figura 16. Fotografías tomadas en el Microscopio Electrónico de barrido de las muestras de Alvac y Carpenter. En las fotografias M1-Alvac-CCH1 y M1-Carpenter-CCH4 se observa la fase gama, gama prima y los carburos finos presentes dentro del grano. En las fotografias M2-Alvac-CG1 y M1-Carpenter-CG1 se observan los carburos gruesos regularmente formados de Ti y Mo. Y en las fotografías M2-

Alvac- CCH1 y M2-Carpenter-CG y CH1 se observan carburos finos que regularmente tienden a situarse al límite de grano, compuestos de Cr y Mo.

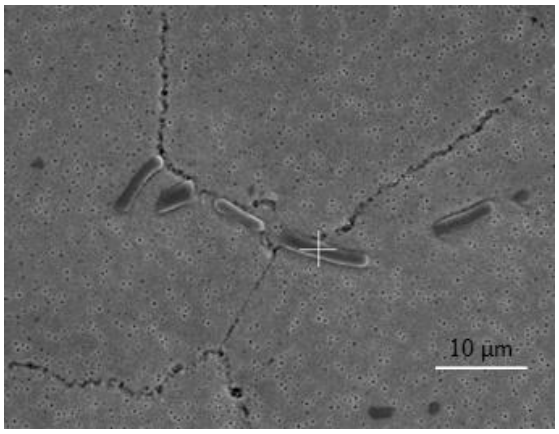
3.3.3 Espectrometría por dispersión de energía (EDS)

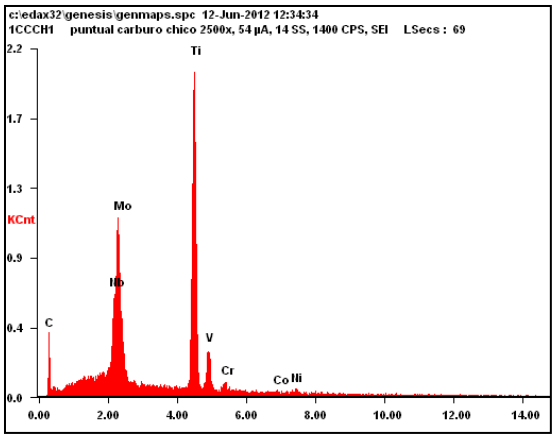




a) Muestra 1 Alvac

Element	*Wt%*	*At%*
C K	**13.35**	42.85
NbL	05.95	02.47
MoL	**23.69**	09.52
TiK	**50.81**	40.88
CrK	02.56	01.90
NiK	03.63	02.38

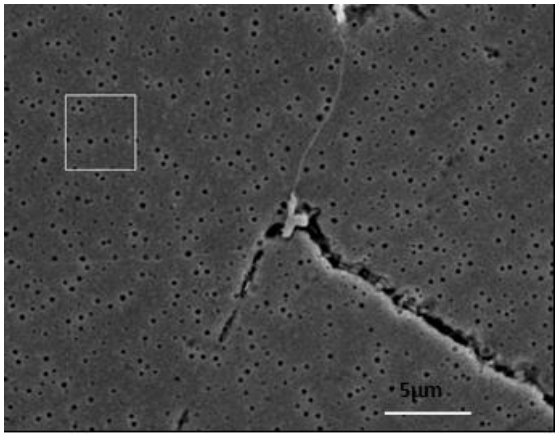


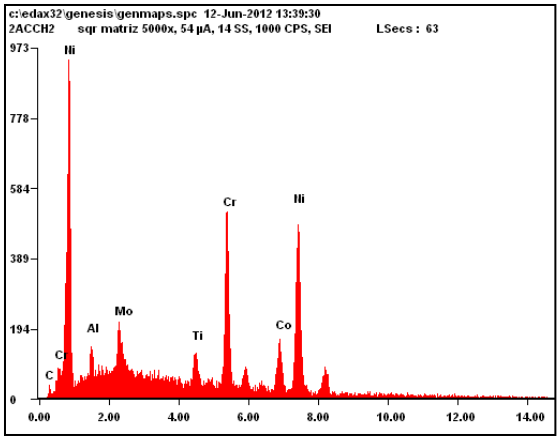


b) Muestra 1-Carpenter

Element	*Wt%*	*At%*
C K	15.42	47.22
NbL	**10.21**	04.04
MoL	**19.97**	07.66
TiK	**48.13**	36.97
V K	00.00	00.00
CrK	02.29	01.62
CoK	01.11	00.69
NiK	02.87	01.80

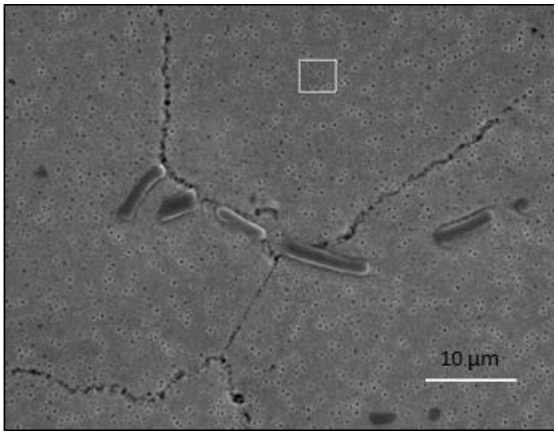
Fig. 17. Carburos del tipo: MC, donde M es el metal que constituye el carburo, siendo regularmente de Ti, Mo, y Nb. [1]
a) Muestra de Alvac, b) Muestra de Carpenter

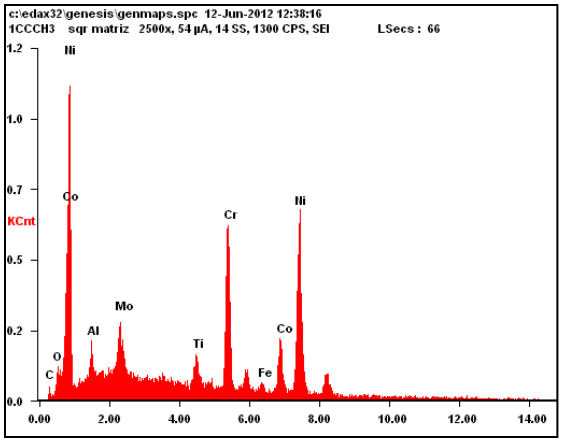




a) Muestra 2-Alvac

Element	*Wt%*	*At%*
C K	01.49	06.68
AlK	01.48	02.95
MoL	04.73	02.66
TiK	02.96	03.33
CrK	**19.54**	20.28
CoK	**14.02**	12.84
NiK	**55.78**	51.26





b) Muestra 1-Carpenter

Element	*Wt%*	*At%*
C K	01.59	06.94
O K	01.27	04.16
AlK	01.39	02.69
MoL	**04.73**	02.58
TiK	02.55	02.79
CrK	**18.38**	18.47
FeK	01.60	01.50
CoK	**13.28**	11.77
NiK	**55.20**	49.12

Fig. 18. Composición de la fase gama de: a) Muestra de Alvac b) Muestra de Carpenter

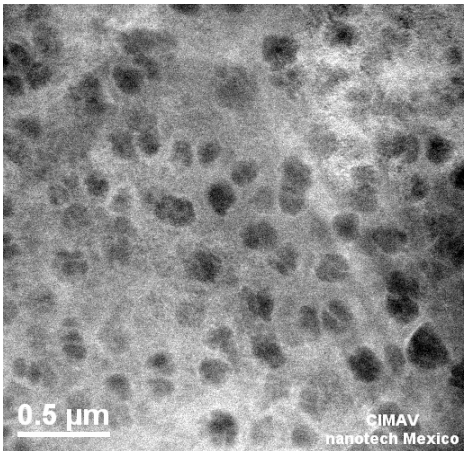
3.4 Microscopia Electrónica de Transmisión

3.4.1 Material Virgen Alvac

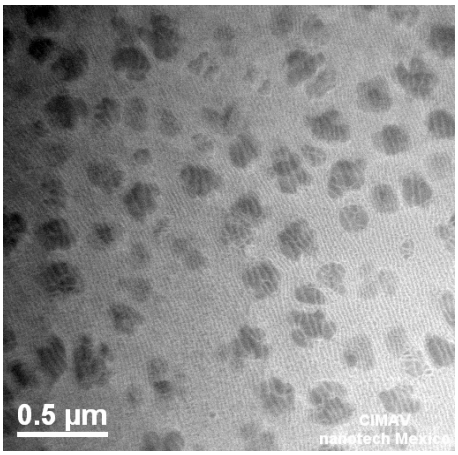
3.4.2 Material procesado Alvac y Carpenter

3.4.1 Material Virgen Alvac

Se observaron las muestras en un Microscopio Electrónico de Transmisión JEM-2200FS. En la microestructura se observaron los precipitados de gamma prima Ni_3(Al, Ti), con una geometría globular.



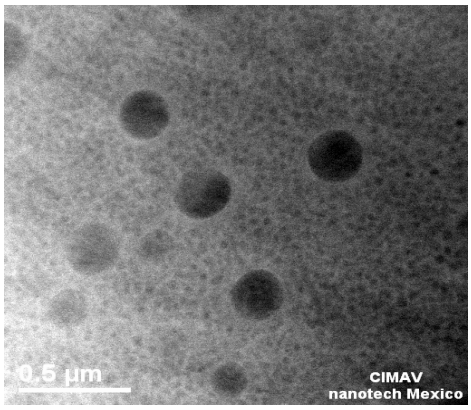
Orilla del lingote



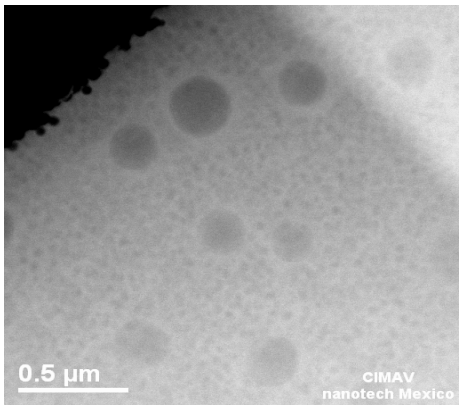
Centro del lingote

Figura 19. Fotografías tomadas en el microscopio electrónico de transmisión de la orilla y centro del lingote de Waspaloy, en las cuales se observa la fase gamma y gama prima Ni_3(Al, Ti).

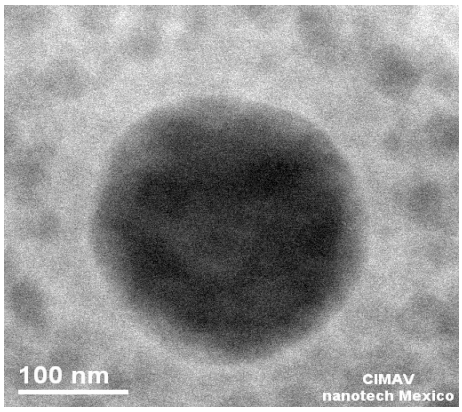
3.4.2 Material procesado Alvac y Carpenter



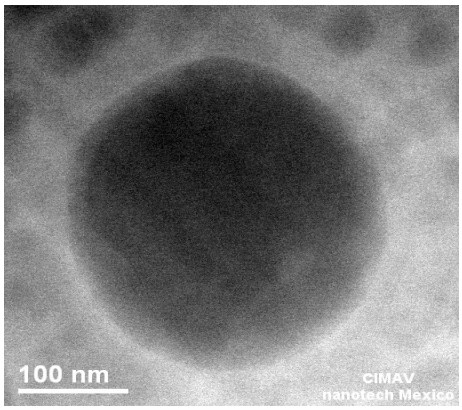
1Alvac-10



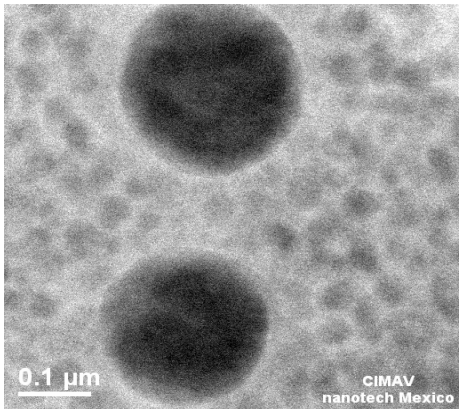
1Carpenter-26



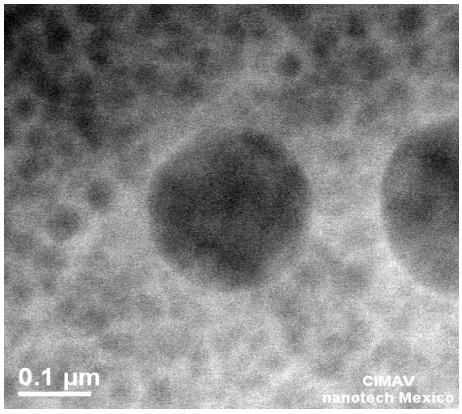
1Alvac- 12



1Carpenter-20



1Alvac-14

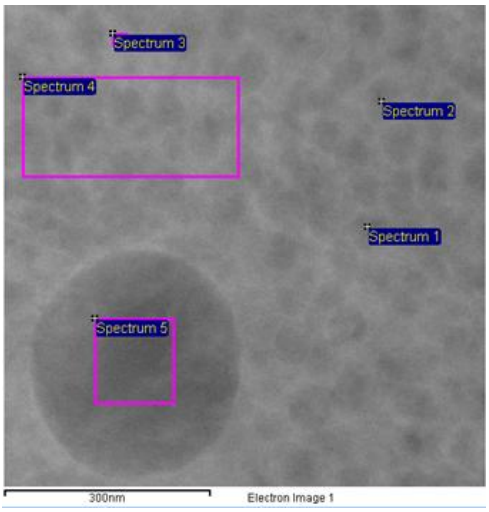


1Carpenter-12

Figura 20. Fotografías tomadas en el microscopio electrónico de transmisión, del material procesado de Waspaloy (Alvac y Carpenter). Se observa la fase gama y gama prima $Ni_3(Al, Ti)$.

En las figuras 19 y 20 se observa la fase gama y gama prima compuesta de Ni_3(Al, Ti) con una estructura globular en la figura 20, existe una diferencia en el material procesado en cuanto a morfología de la fase gama prima, esto es debido a los tratamientos térmicos realizados en el proceso de conformado.[12][13]

3.4.3 Espectrometría por dispersión de energía

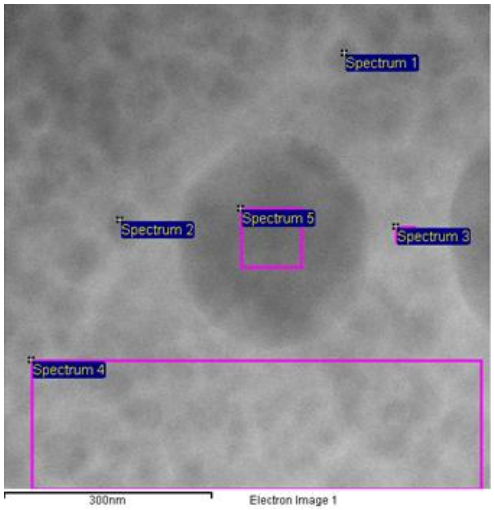


Muestra 1-Alvac

Figura 21. Fotografía de una muestra de Alvac, tomada en el Microscopio Electrónico de Transmisión que nos muestra las secciones analizadas por un análisis EDX.

Tabla VII. Elementos detectados en EDS, de la muestra 1 Alvac-material procesado**.**

Espectro	C	Al	S	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Mo
1	0.70	1.37		4.30	13.68	0.78	9.27	53.89	12.82	3.18
2	0.87	1.24		5.14	12.05	0.66	8.94	55.55	12.35	3.19
3	0.53	0.61		1.81	18.96	1.16	12.72	48.21	12.36	3.62
4		0.85		2.44	17.47	1.12	11.72	49.67	12.78	3.96
5		2.14	0.25	10.76	2.61	0.25	4.11	66.47	12.38	1.03



Muestra 1 Carpenter

Figura 22. Fotografía de una muestra de Carpenter, tomada en el Microscopio Electrónico de Transmisión que nos muestra las secciones analizadas por un análisis EDS.

Tabla VIII. Elementos detectados en EDS, de la muestra 1 Carpenter-material procesado**.**

Espectro	C	Al	S	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Mo
1	0.43	1.58		5.88	10.48	0.82	7.27	57.78	13.02	2.74
2	0.68	1.36		5.17	11.04	0.73	8.08	56.61	13.40	2.94
3		0.43		1.63	19.45	1.15	12.27	47.35	13.33	4.40
4		0.68		2.30	18.10	1.06	11.07	49.54	13.19	4.05
5		1.96	0.12	7.63	7.29	0.42	6.25	61.23	13.49	1.63

3.5 Composición Química

3.5.1 Análisis Químico ICP

3.5.2 Material virgen Alvac

3.5.3 Material procesado Alvac y Carpenter

3.5.1 Análisis químico ICP

ICP-MS (Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo) es una técnica de análisis inorgánico que es capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica. Consiste en un equipo dotado de un monocromador posterior a la muestra y una serie de detectores dedicados a cada elemento en diferentes posiciones del plano focal.

La muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de Ar. Los iones una vez formados pasan al espectrómetro de masas donde son separados mediante un analizador y detectados.

De las muestras del material virgen de Alvac y procesado de Alvac y Carpenter, se obtuvo rebaba y se hizo un análisis ICP, los resultados obtenidos se observan en la tabla No. 9 y 10

3.5.2 Composición química del material virgen Alvac.

Tabla IX. Composición química de Waspaloy (material virgen), por análisis ICP

	C	**Mn**	**Si**	**S**	**P**	**Cr**	**Ni**
Nominal	0.03-0.10	0.0-0.10	0.0-0.15	0.0-0.015	0.0-0.015	18-21	Balance
Medición	0.036	0.02	0.03	0.003	0.004	19.61	Balance
	Co	**Fe**	**Mo**	**Ti**	**Al**	**B**	**Zr**
Nominal	12-15	0.0-2.0	3.5-5.0	2.75-3.25	1.2-1.6	0.003-0.010	0.02-0.08
Medición	13.24	0.9	4.19	3.06	1.36	0.007	0.06

3.5.3 Composición química del material procesado Alvac y Carpenter

Tabla X. Composición química del lingote de Waspaloy (material procesado), por análisis ICP.

Elemento	Muestra Alvac	Muestra Carpenter	Norma ASTM B637 Grado 685 Waspaloy
Al%	1.266	1.212	1.20-1.60
B%	N.D.	N.D.	0.003-0.01
C%	0.032	0.051	0.03-0.10
Co%	12.331	12.254	12.00-15.00
Cr%	18.171	19.262	18.00-21.00
Cu%	0.015	0.012	0.50 Max.
Fe%	2.047	1.085	2.00 Max
Mn%	0.034	0.013	1.00 Max
Mo%	3.948	3.955	3.50-5.00
Nb%	0.068	0.072	
Ni%	58.296	59.635	Bal.
P%	N.D.	N.D.	0.030 Max
S%	0.021	0.021	0.030 Max
Si%	0.061	0.057	0.75 Max
Ta%	0.008	0.005	
Ti%	2.755	2.754	2.75-3.25
V%	0.049	0.092	
W%	0.051	0.022	
Zr%	0.029	0.014	0.02-0.12

En la tabla IX se muestra la composición química certificada del fabricante, y la composición en la medición del análisis ICP del material virgen de Waspaloy, los valores detectados son similares al requerimiento para la fabricación de Waspaloy.

Los resultados del análisis químico obtenido en las muestras del material procesado de Alvac y Carpenter mostrados en la tabla X, están dentro del rango especificado, según la norma ASTM B-637 grado 685 de la aleación Waspaloy.

ANALISIS DE RESULTADOS

Composición química

La composición química del lingote de Waspaloy está dentro del rango especificado en la composición nominal, mostrado en las tablas No. 9 y 10 según el análisis ICP realizado. Existe una mínima variación en la composición química entre las 6 muestras analizadas del material virgen de Alvac y el material procesado de Alvac y Carpenter.

Microestructura

- El tamaño de grano localizado en la superficie externa del lingote de las muestras del material virgen de Alvac, es más bajo que el tamaño de grano localizado en el centro del lingote de Waspaloy, mostrado en la tabla No. 1. Esta variación en el tamaño de grano es debido a las diferentes velocidades de enfriamiento en la superficie externa y el centro del lingote de Waspaloy. El centro del lingote tuvo una baja velocidad de enfriamiento a diferencia de la superficie externa del lingote, la cual sufrió velocidades altas de enfriamiento.
- El tamaño de grano según la norma ASTM E-112 del material procesado de las muestras de Alvac está en el rango de 4.0-4.5, y para el material de Carpenter está en el rango de 4.5-5.0, como se muestra en la tabla 2
- La microestructura de Waspaloy está constituida por una matriz de níquel (γ), y una fase γ′ de finos precipitados con una morfología globular, se observo en el Microscopio Electrónico de Transmisión, mostrado en las imágenes 19 y 20.
- El análisis de Espectrometría por Dispersión de Energía (EDS), realizado en el Microscopio Electrónico de Transmisión, se detecto la fase gama y gama prima compuesta de $Ni_3(Al, Ti)$, como lo muestran las imágenes 21 y 22
- Se observo en el Microscopio Electrónico de Barrido la presencia de carburos en las muestras del material virgen de Alvac y el material procesado de Alvac y Carpenter, mostrado en las imágenes 15 y 16.
- El análisis de Espectrometría por Dispersión de Energía (EDS), realizado en el Microscopio Electrónico de Barrido se observan los espectros en las imágenes 17 y 18 con contenidos de C, Ti y Mo, lo que nos indica que son los carburos presentes en la aleación.

Durezas

Los resultados de dureza en Rockwell “C” del material virgen, en la muestra localizada en la superficie externa del lingote fue (35 HRC), la cual es alta en comparación con la medición de la muestra localizada en el centro del lingote (24 HRC), mostrado en la tabla No. 4. En el material procesado de Alvac se obtuvo una dureza de (35.9 HRC) y Carpenter (36.75 HRC), como se muestra en la tabla No 5.

Conclusiones

Composición Química

- Existe una mínima variación, en ambos proveedores (Alvac y Carpenter) con respecto a la composición química en las muestras analizadas del lingote de Waspaloy como se observa en la tabla Nº 10

Microestructura

- La microestructura del material virgen presenta variaciones en tamaño de grano, de la superficie externa al centro del lingote, en la superficie externa, la medición del tamaño de grano es menor comparada con la medición del tamaño de grano del centro. Sin embargo, esta variación es ocasionada por velocidades de solidificación, debido a que en el centro del lingote existe el tiempo suficiente para el crecimiento de grano, mientras que en la superficie externa el enfriamiento es más rápido.
- Las mediciones del tamaño de grano del material procesado muestran una mínima variación comparado con el material virgen.
- Se encontró una mínima variación en los dos proveedores (Alvac y Carpenter), con respecto al material procesado en cuanto a tamaño de grano, debido a que amabas muestras tenían el mismo tratamiento térmico.
- En microscopia electrónica de barrido, las muestras de los dos proveedores presentan el mismo tipo de estructura, mostrándose la fase gama prima con geometría globular, carburos a lo largo de los limites de grano y dentro del grano, el análisis EDX detecto contenidos similares de fase gama, gama prima y carburos.
- En microscopia electrónica de transmisión, se observa en los dos proveedores el mismo tipo de geometría en la fase gama prima, y el mismo tipo de elementos dentro de ella.

Dureza

- La dureza en Rockwell “C” es baja en el centro del lingote, comparada con la superficie externa del lingote, esto es debido al tamaño de grano por la solidificación.

  En cuanto al material procesado, no se encontró diferencia significativa en las mediciones de dureza en Alvac y Carpenter.

Por lo que en el presente trabajo, se concluye que no existe variación significativa en cuanto a composición química, microestructura, tamaño de grano, y dureza que pudiera estar ocasionado fractura en las piezas procesadas por forja del Waspaloy.

Recomendaciones

Se recomienda analizar piezas procesadas que contengan grietas, para determinar en que paso del proceso de fabricación se generan dichas grietas y posibles fracturas.

Algún tipo de variación en el proceso podría ser la causa de la fractura en las muestras de Waspaloy de la empresa Frisa.

Referencias

[1] W.L. Mankins y S. Lamb, Metals Handbook, Propiedades y Selección: Aleaciones no Ferrosas y Aplicaciones Especiales, vol. 2, 1990, pp. 1366-1370.

[2] E.W. Ross y C.T. Sims, Nickel-Base Alloys, Superalloys II, C.T.Sims, N.S. Stoloff y W.C. Hagel, Ed., John Wiley y Souns, 1987, pp. 97-133.

[3] Norma ASTM E-112, Standar test methods for determining average grain size, 1996.

[4] M.J. Donachie y S.J. Donachie, Superalloys: A Technical Guide 2nd ed., ASM International 2002.

[5] George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 2nd ed., 1976, Mc Graw Hill, pp. 196-197.

[6] Blaine Geddes, Hugo Leon, Xiao, Huang, Superalloys, Alloying and performance, ASM International 2010, pp. 60-104.

[7] Harry Chandler, Heat Treatment Guide, Practices and Procedures for Nonferrous Alloys, 1996, pp. 76-80.

[8] Sadao Ohta, Ken-Ichi Aota, Takemitsu Honjo, Toshiya Moriyama, “Hot Workability of Several Fe, Ni and Co-Base Alloys”, Vol. 32, Jul 1982, pp. 14.

[9] S.L. Semiatin, R.C. Kramb, R.E. Turner, F. Zhang, and M.M. Anthony, “Analysis of the homogenization of a nickel-base superalloy”, Scripta Materials, 51 (2004), pp. 491-495.

[10] R.C. Kramb, M. M. Antony, and S.L. Semiatin, “Homogenization of a nickel-base superalloy ingot material”, Scripta Materiala, 2006, pp.1645-1649.

[11] Gangshu Shen, S.L. Semiatin, and Rajiv Shivpuri, “Modeling Microstructural Development during the Forging of Waspaloy”, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 26A, (1995), pp. 1795-1803.

[12] Ricky L. Whelchel, V. Siva Kumar G. Kelekangery, Rosario A. Gerhardt, and Jan Ilavsky, “Effect of Aging Treatment on the Microstructure and Resistivity of a Nickel-Base Superalloy”, vol. 42 A, mayo 2011, pp. 1362-1365.

[13] S. L. Semiatin, D.S. Weaver, P.N. Fagin, M.G. Glavicic, R.L. Goetz, N.D. Frey, R.C. Kramb, and M.M. Antony, “Deformation and Recrystalization Behavior during Hot Working of a Coarse-Grain, Nickel-Base Superalloy Ingot Material”, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 35A, (2004), pp. 679-693.