

Metalurgia de álabes móviles con banda integrada de turbinas de gas y su influencia sobre el comportamiento de los álabes^(*)

Z. Mazur^(*), C. Mariño^(*) y J. Kubiak^(*)

Resumen Se presenta la influencia de la microestructura en el comportamiento de los álabes móviles con banda integrada de turbinas de gas bajo condiciones reales de trabajo. Para el proceso de vaciado convencional (granos equiaxiales) de los álabes de turbinas de gas se lleva a cabo el análisis del proceso de solidificación presentando todos los elementos que influyen al modo de solidificación de un álabe y en la variación de la microestructura resultante. Se hace la evaluación de la falla de un álabe con la banda integrada de turbina de gas presentando el mecanismo de la falla y la influencia de la microestructura de la banda del álabe al inicio y propagación de la falla. Finalmente, se presentan las conclusiones determinando los elementos principales de la microestructura que influyen en el comportamiento de los álabes y las medidas preventivas para adecuar la microestructura a las condiciones de trabajo de los álabes.

Palabras clave: **Álabes de turbinas de gas. Métodos de vaciado de álabes. Microestructura de los álabes. Granos equiaxiales y columnares.**

Metallurgy of gas turbine blades with integral shroud and its influence on blades performance

Abstract The influence of the microstructure of the gas turbine blades with integral shroud on the blades performance is presented. The analysis of the solidification process of the gas turbine blades during conventionally casting process (equiaxed grains) with all elements which has influence on the mode of its solidification and variation of the microstructure is carried out. Also, the evaluation of the failure of the gas turbine blade is presented. A detailed analysis of the blade tip shroud microstructure (presence of the equiaxed and columnar grains) and its influence on the failure initiation and propagation is carried out. Finally, conclusions and some necessary improvements of the blades casting process to prevent blades failures are presented.

Keywords: **Gas turbine blades. Casting methods of blades. Blades. Microstructure. Equiaxed and columnar grains.**

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las fallas de los álabes móviles de turbinas de gas son causadas por la combinación de diferentes mecanismos, debido a que la carga de los álabes en la turbina es un proceso complejo que

incluye la carga térmica cíclica sobrepuesta a la alta carga centrífuga. Además, cada uno de estos mecanismos está afectado por el ambiente al que están expuestos los álabes. Si el álabe está expuesto a un ambiente corrosivo, éste puede atacar de manera agresiva la aleación del álabe y reducir drásticamente su capacidad de carga.

En algunos casos, la microestructura y morfología de los granos desempeñan un papel principal para la iniciación y propagación de la falla. Esto es especialmente cierto si se presenta alguna variación de la microestructura y morfología de los granos en el

(*) Trabajo recibido el día 5 de octubre de 1998 y aceptado en su forma final el 19 de diciembre de 1998.

(*) Instituto de Investigaciones Eléctricas. Av. Reforma 113. Col. Palmira 62490. Temixco, Morelos (México). E-mail: mazur@iie.org.mx

cuerpo (volumen) del material del álabe y cuando esta variación de la microestructura está relacionada con la variación de las propiedades mecánicas del material del álabe. En los álabes móviles de las turbinas de gas, fabricados por el proceso de vaciado convencional (granos equiaxiales), uno de los elementos controlados que tienen una influencia directa sobre el comportamiento de los álabes a temperatura elevada es el tamaño de los granos, su forma y número.

Comúnmente, los granos columnares, los cuales intersectan las superficies de los elementos delgados del perfil de los álabes móviles, que trabajan a alta temperatura, están limitados a cierto tamaño, ángulo de inclinación de su dimensión mayor y el área (porcentaje de área).

2. METALURGIA DE LOS ÁLABES MÓVILES VACIADOS POR EL PROCESO CONVENCIONAL CON LA MICROESTRUCTURA DE LOS GRANOS EQUIAXIALES

En el proceso de vaciado convencional, la aleación fundida se vacía normalmente en un molde con una conductividad térmica, K_m , relativamente baja. En estas condiciones, la pérdida del calor se presenta a través de las paredes del molde. En el caso de un molde cerámico con un radio interno, r , y de espesor de pared, a (Fig. 1), donde las pérdidas del calor tienen lugar solamente a través de las paredes del molde, el gradiente principal de la temperatura se presenta dentro de la cerámica porque la conductividad térmica del metal sólido y líquido es general-

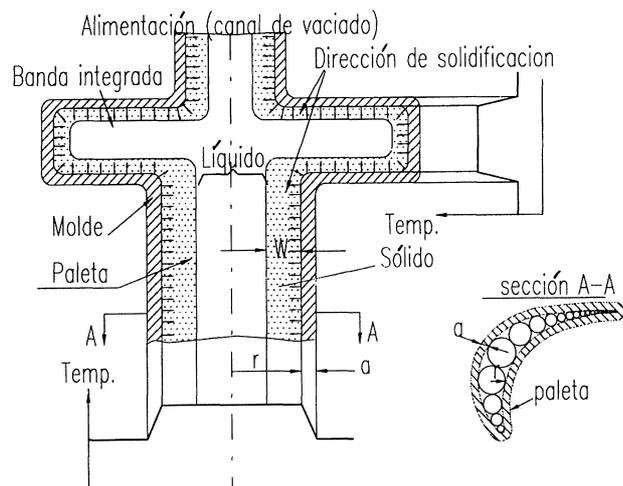


FIG. 1.— Diagrama esquemático de la configuración molde-horno y distribución de la temperatura durante el vaciado convencional.

FIG. 1.— Schematic diagram of the mould-furnace configuration and temperature distribution during conventional casting.

mente mucho mayor que K_m . La velocidad de crecimiento (espesor del metal solidificado - w) disminuye cuando la interfase sólido-líquido está progresando hacia el centro de la fundición (1). Normalmente, los parámetros del proceso de vaciado se están variando para evaluar su efecto sobre la microestructura y las propiedades de la fundición. Por lo común, estos parámetros incluyen la temperatura de precalentamiento del molde cerámico, el grado de sobrecalentamiento del metal líquido (es decir, hasta qué valor por encima de la temperatura de fusión se calienta el metal líquido), la cantidad y la colocación de cualquier material aislante aplicado al molde cerámico. Con todos estos parámetros se disponen los instrumentos para el control de la velocidad y la forma de solidificación de un metal líquido.

Cuando se realiza la solidificación del metal, esta se presenta en la forma de muchos pequeños cristales o "granos" que tienen gran variedad de tamaños y formas que pueden controlarse hasta cierto grado, por el modo de extracción del calor del sistema metal-molde.

En el proceso de "vaciado convencional", la extracción del calor se lleva a cabo en todas las direcciones. Pero el calor no se transmite necesariamente a la misma velocidad en todas las direcciones por las diferencias en masa del metal, en distintos lugares del álabe, de una forma asimétrica. Estas diferencias en la velocidad de extracción del flujo de calor del sistema molde-metal hacen que el crecimiento de los granos, en tamaño y forma, pueda variar de los uniformes hasta los muy alargados.

El grano del cual "el factor de forma" (es decir, la relación entre la longitud máxima y la mínima normal a la anterior) tiene el valor 1, es perfectamente equiaxial. En la realidad, en las fundiciones comerciales, cada grano con factor de forma menor de 3 ó 4 se considera como equiaxial. Por convección, los granos alargados con factor de forma mayor que 4 se les llaman granos columnares. Estos se forman bajo las condiciones de solidificación donde la extracción del calor se realiza primeramente en una sola dirección. Los granos equiaxiales se forman bajo las condiciones de extracción del calor más o menos uniformes en todas las direcciones. Por esto, para las secciones delgadas como la banda integrada de los álabes móviles, la microestructura de los granos tiende a ser columnar a través del espesor de la banda, debido a que el calor se extrae de la superficie superior e inferior de la banda. Por el contrario, las secciones gruesas tienden a tener los granos columnares cerca de la superficie y los granos equiaxiales grandes cerca del centro de la fundición.

Estas condiciones se presentan en la figura 2. En la sección del álabe existe la estructura de los granos columnares alrededor del radio de acuerdo con la dirección de la banda hacia abajo de la paleta. La dirección del crecimiento de los granos columnares

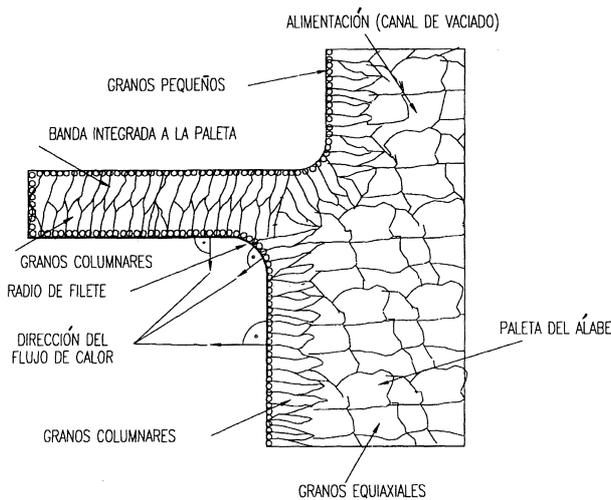


FIG. 2.— Formación de los granos finos, columnares y equiaxiales en diferentes secciones del álabe.

FIG. 2.— Formation of the fine, columnar and equiaxed grains in different sections of the blade.

cambia perpendicularmente a la superficie del molde reflejando la dirección de extracción del flujo de calor del metal líquido durante la solidificación. También, un aspecto muy importante del proceso de vaciado a la cera perdida para los álabes móviles de turbinas de gas, es la aplicación de los “modificadores del molde”, que es un material colocado sobre la superficie interna de la cavidad de un molde, para suministrar los sitios para los granos pequeños en la superficie, los cuales aumentan la resistencia contra las fisuras desarrolladas en la superficie (Fig. 2), que se producen típicamente por la fatiga.

Por otro lado, las mejores propiedades a la termofluencia se obtienen con la estructura de los granos de tamaño grande, por eso es preferible que los granos interiores sean grandes. De esta manera, la capa del modificador acelera la formación de la capa de los granos finos sobre los granos grandes en el interior y de esta manera se logra el mejor compromiso entre las dos diferentes microestructuras que optimizan las propiedades mecánicas del álabe para su trabajo a altas temperaturas, bajo la carga variable estática y dinámica.

3. COMPORTAMIENTO DE LOS ÁLABES CON LA BANDA INTEGRADA A SU EXTREMO EN LAS CONDICIONES REALES DE LA VARIACIÓN DE LA MORFOLOGÍA DE LOS GRANOS Y LA INFLUENCIA DE UN AMBIENTE CORROSIVO

Los materiales reales, con los que se fabrican los álabes de turbinas de gas, son las aleaciones de

multicomponentes, que frecuentemente forman varias fases durante o después de la solidificación y que tienen un amplio rango de temperaturas de fusión. En consecuencia, la solidificación se presenta en un amplio rango de temperaturas y puede ponerse de manifiesto la microsegregación dentro de la aleación.

La variación de la temperatura de líquidus resultante de la segregación en el frente fundido de la interfase sólido-líquido es una función sensible de la V_I (velocidad de avance de la interfase de solidificación) para un gradiente dado de la temperatura G_L . Con el aumento de V_I , el rango de las composiciones de un sólido se incrementa también, resultando una segregación transversal.

A medida que el valor experimental de G_L-V_I se desvía por encima de un valor crítico, se puede observar la progresión de las siguientes formas microestructurales presentadas esquemáticamente en la figura 3, adaptada de un esquema descrito por Flemings (2).

a) Frente plano. b) Celular. c) Dendrítico. d) Equiaxial sin direccionalidad obvia.

Se presenta un claro aumento progresivo en la relación superficie-volumen para las células con el incremento de V_I y G_L . Es necesario generar por la difusión radial un mayor calor latente de solidificación, necesario para equilibrar las pérdidas del calor mayores en alto V_I y G_L . Los factores que guían las transiciones entre diferentes morfologías de solidificación son totalmente similares y probablemente es posible identificar los diferentes valores críticos de G_L/V_I para cada transición.

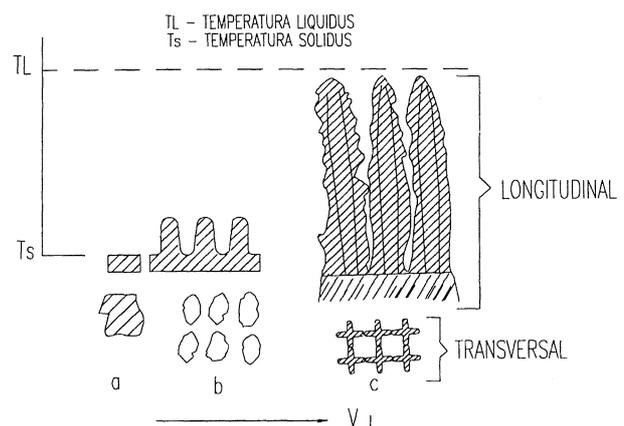


FIG. 3.— Ilustración esquemática de la variación de la forma del frente de solidificación con el incremento de V_I para la constante G_L .

a) Frente plano. b) Celular. c) Dendrítico

FIG.3.— Schematic illustration of the changing shape of the solidifying front with increasing V_I for a constant G_L .

a) Planar front. b) Cellular. c) Dendritic

La figura 4 (1) presenta las microestructuras obtenidas en una aleación base níquel durante la solidificación direccional con la variación de los valores G_L y V_I . Los diferentes tipos de las morfologías de solidificación caen dentro de diferentes zonas en el diagrama de $\log G_L$ en función de $\log V_I$, los cuales son consistentes con las transiciones entre las zonas dadas por las bandas G_L/V_I . Hay un claro incremento en la relación superficie/volumen para las celdas conforme aumenta V_I y G_L .

La solidificación durante el vaciado de los álabes móviles es predeterminada por su tamaño y la geometría, por ciertas propiedades físicas de la aleación (es decir, calor latente, calor específico, densidad), por las características térmicas de la aleación del molde, y por las temperaturas de la fusión inicial y la temperatura local debido a la absorción del calor.

Como consecuencia, la microestructura obtenida será variable entre diferentes partes del álabe. Cuando la razón G_L/V_I es mayor de un valor crítico, la microestructura se invierte de equiaxial a columnar.

En este trabajo se analiza la falla de un álabe móvil de 430 mm de longitud, con la banda integrada al extremo de la paleta, fabricado con una aleación base níquel Udimet 500. El álabe tenía fracturada la sección de la banda en el lado de presión de la paleta, a lo largo de la trayectoria paralela a la superficie de la paleta en el borde del radio del filete paleta/banda (Figs. 5 y 6 comparado con un álabe nuevo). La fractura cambió su dirección y siguió hacia la muesca-zeta de la cara sin contacto a lo largo del borde de salida del sello. La microestructura dendrítica (granos equiaxiales) era evidente sobre la mayoría de la superficie de fractura en el lado de presión, con la excepción del extremo de la fractura en el borde de salida donde tenía una apariencia irregular (columnar), como se indica en la figura 9. La orientación de los granos columnares fue $\Theta = 0^\circ$ hasta 15° en relación con el eje longitudinal del álabe. Algunos granos columnares intersecaron a través de todo el espesor de la banda (Fig. 7). La propagación de la fractura en esta zona era transgranular.

En la zona de iniciación de la fractura en la banda, la morfología dendrítica era típica para todos los álabes, pero el inicio de la fisura en la banda a lo largo del lado del canal de flujo de gas tenía una apariencia irregular que tuvo lugar a través del grano (fisura transgranular, Fig. 8). La zona de la falla presentaba un ataque de corrosión en caliente y tenía una gruesa capa de depósito y picaduras. La figura 9 presenta una distribución aproximada de los dos diferentes tipos de granos; equiaxiales y columnares en la banda de algunos álabes.

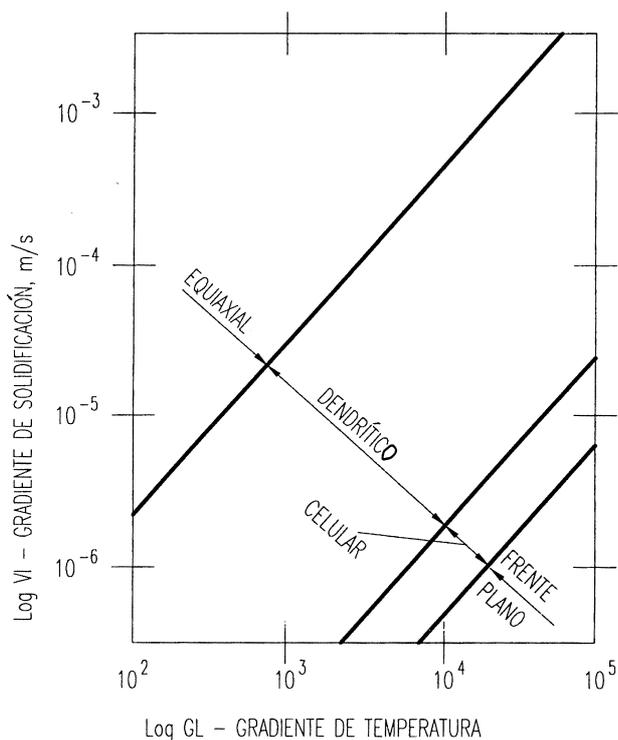


FIG. 4.— Morfologías de superaleaciones de base níquel durante la solidificación direccional, representadas gráficamente en las coordenadas de $\log V_I$ en función de $\log G_L$.

FIG. 4.— Morphologies of directionally solidified nickel-base superalloys mapped on a plot of $\log V_I$ versus $\log G_L$.

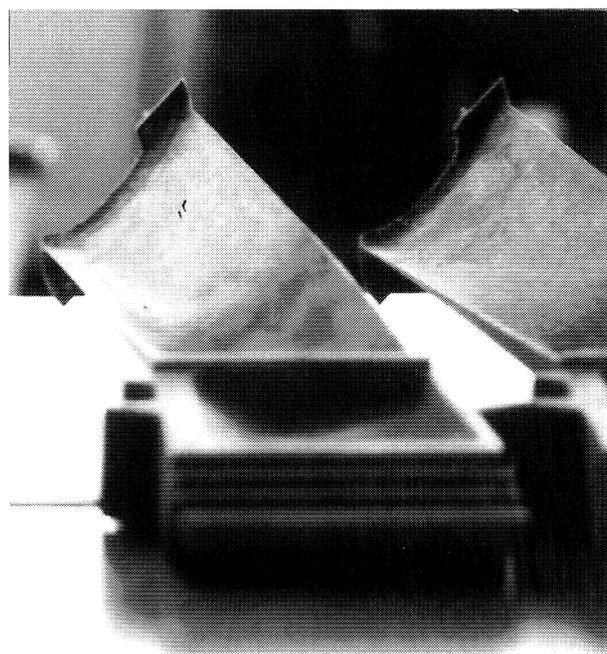


FIG. 5.— Fractura en la sección de la banda del álabe móvil.

FIG. 5.— Fracture of the blade tip shroud section.

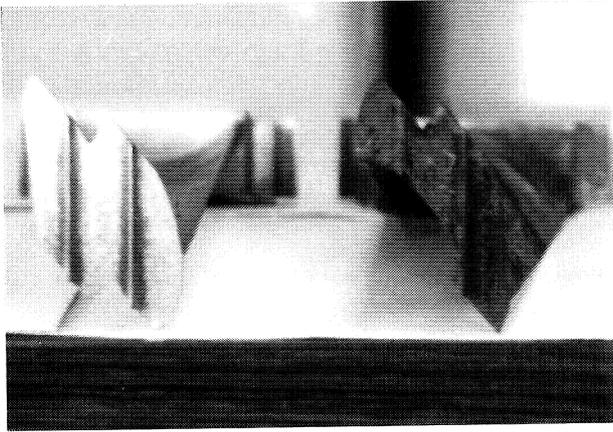


FIG. 6.— Fractura en la banda del álabe en comparación con el álabe nuevo.

FIG. 6.— Blade tip shroud fracture compared to the new one.

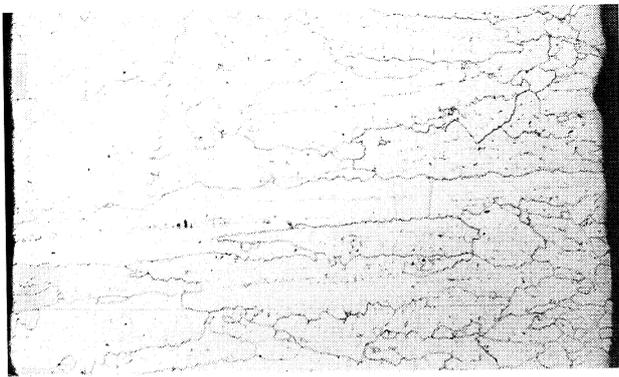


FIG. 7.— Morfología de los granos en la banda del álabe.

FIG. 7.— Grains morphology of the blade tip shroud.

Este tipo de formación y distribución de los granos es el resultado del proceso de vaciado del álabe. Debido al espesor muy delgado de la banda (2,4-3,3 mm) y su superficie relativamente grande, la extracción del calor (dirección del flujo de calor, gradiente de temperatura y velocidad de solidificación) era vertical en ciertas zonas de la banda durante el proceso de solidificación, dando lugar a la solidificación direccional y a la formación de los granos columnares que intersectan todo el espesor de la banda junto con la formación de los granos equiaxiales.

La presencia de los granos columnares que atraviesan todo el espesor de la banda y que tienen una superficie límite grande, orientada perpendicularmente a los esfuerzos principales de tensión (Fig. 10), facilita la propagación de la fisura, y con una pequeña energía aplicada es posible la propagación de la fisura por todo espesor de la banda. Este fenómeno está explicado en la figura 11.

La fisura tiene la propagación a lo largo de una línea recta continua, sin ningún elemento que pueda

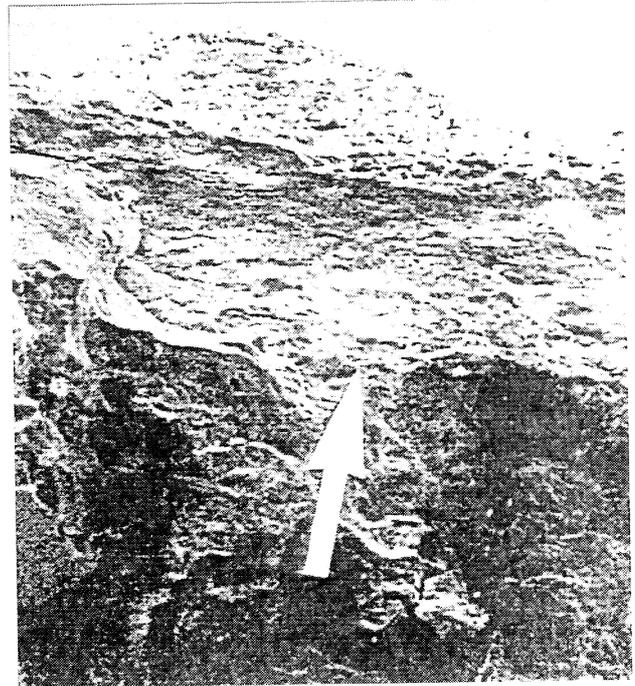


FIG. 8.— Inicio transgranular de la fisura en la banda del álabe.

FIG. 8.— Transgranular crack initiation in the blade tip shroud.

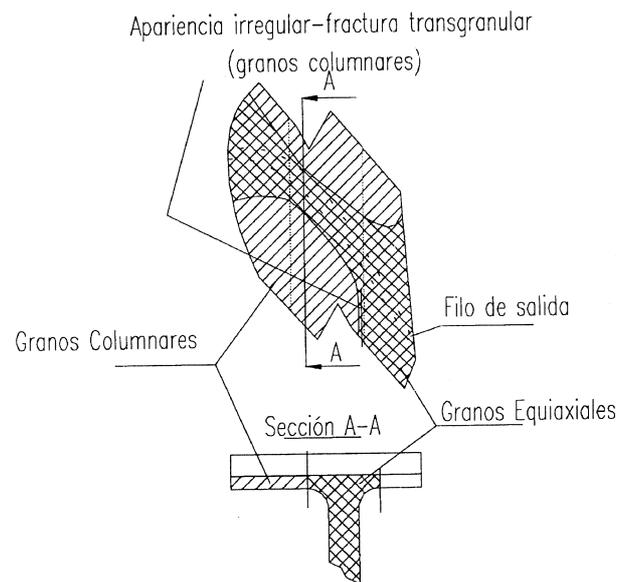


FIG. 9.— Distribución aproximada de los diferentes tipos de granos en la banda del álabe.

FIG. 9.— Approximated distribution of the different types of grains in the blade tip shroud.

demorar el proceso de propagación de la fisura por todo el espesor de la banda.

Además, los granos columnares presentan un módulo de elasticidad, E_c , de 30 hasta 40 % menor

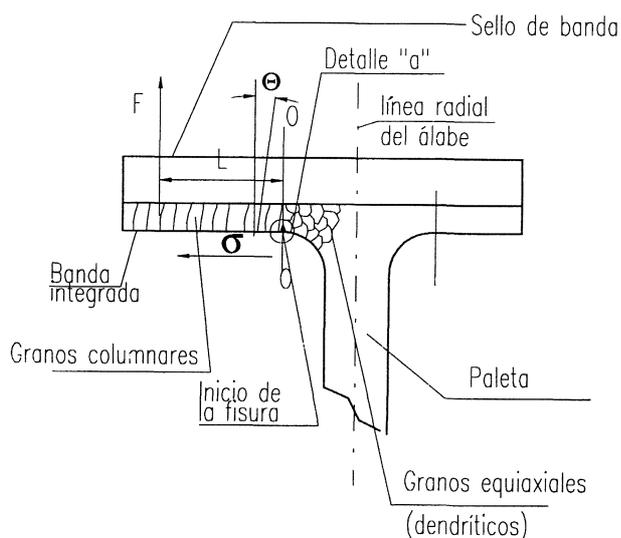


FIG. 10.— Relación entre los elementos microestructurales y los esfuerzos en la banda integrada del álabe.

FIG. 10.— Relation between the microstructural elements and stresses in the blade tip shroud.

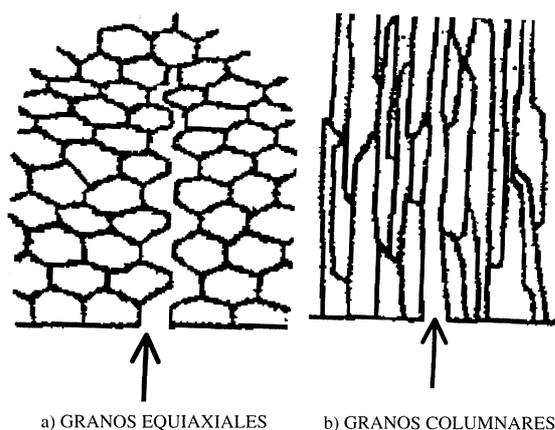


FIG. 11.— Propagación de la fisura en granos equiaxiales y columnares.

FIG. 11.— Crack propagation in the equiaxed and columnar grains.

que los granos equiaxiales, E_e , en la orientación paralela a la dirección de solidificación $\langle 001 \rangle$. Esto significa que el rango de los esfuerzos cargados por granos columnares durante la operación es de 30 hasta 40 % menor que en los granos equiaxiales. Los esfuerzos mecánicos σ en la zona de elasticidad pueden calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \epsilon * E \quad [1]$$

En el caso de la presencia de los dos tipos de granos (columnares y equiaxiales) en una sección

delgada y con un pequeño número de granos equiaxiales, la distribución de los esfuerzos en estos granos es proporcional a sus módulos de elasticidad de acuerdo con la ecuación:

$$\Delta\sigma_c = \frac{E_c}{E_e} * \Delta\sigma_e \quad [2]$$

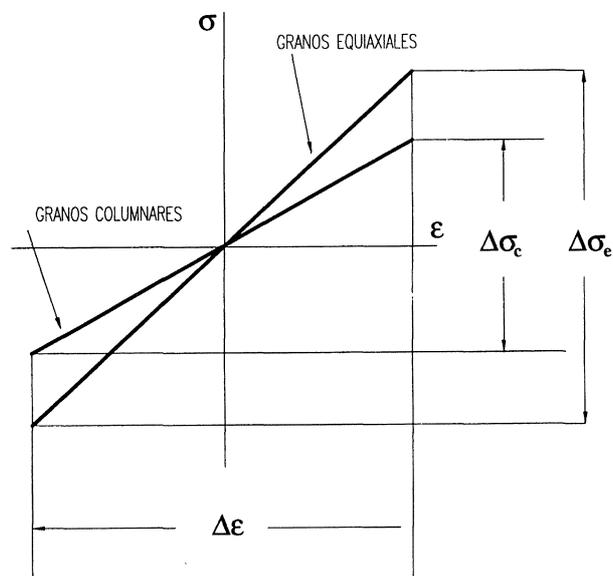
donde $\Delta\sigma_c$ = esfuerzos en granos columnares, y $\Delta\sigma_e$ = esfuerzos en granos equiaxiales.

En el caso del álabe analizado, los esfuerzos principales distribuidos de acuerdo con esta ecuación son los esfuerzos tangenciales debido a fuerza cortante, F , que incluye la acción de la fuerza centrífuga, flujo de gas y la componente radial de la fuerza de contacto entre los álabes.

Además, los esfuerzos térmicos inducidos por el calor en el componente están dados por la ecuación:

$$\Delta\sigma_t = a * E * \Delta T \quad [3]$$

Para la misma situación descrita anteriormente, los esfuerzos térmicos en los granos columnares y equiaxiales se distribuirán según la ecuación anterior. La representación gráfica de esta relación para los esfuerzos combinados mecánicos y térmicos se presenta en la figura 12.



LEYENDA:

$\Delta\sigma_c$ = ESFUERZOS EN GRANOS COLUMNARES

$\Delta\sigma_e$ = ESFUERZOS EN GRANOS EQUIAXIALES

$\Delta\epsilon$ = RANGO DE DEFORMACIÓN TOTAL.

FIG. 12.— Distribución de los esfuerzos en granos columnares y equiaxiales.

FIG. 12.— Stress distribution in the columnar and equiaxed grains.

Como resultado, en la zona de transición de los granos columnares y equiaxiales, se forma un escalón que significa una concentración de los esfuerzos favoreciendo el inicio y propagación de la grieta (Fig. 13).

La magnitud de concentración de los esfuerzos es variable durante la operación del álabe, sometido a los ciclos variables de trabajo, de carga, de transitorios de la temperatura, arranques, paros y cambios de carga.

Durante estos ciclos repetitivos, se desarrollan las condiciones para la iniciación y propagación de las fisuras típicas de la fatiga termomecánica en los ciclos bajos.

La microestructura de los granos columnares presenta la ventaja de una mayor resistencia a la termofluencia y a la fatiga térmica. Debido a que los límites de granos están alineados en forma paralela al eje de los esfuerzos principales, se minimizan los esfuerzos que actúan sobre los límites de grano retardando así el inicio de la falla y aumentando la resistencia a la termofluencia. También los granos alineados en paralelo a la dirección de los esfuerzos principales (dirección de solidificación) presentan un módulo de elasticidad bajo (mayor ductilidad), que resulta un aumento significativo de la resistencia a la fatiga térmica.

Pero en el caso de la banda integrada al extremo del álabe, los granos columnares que intersectan el espesor de la banda (Fig. 14) facilitan la propagación de la fisura como se comentó anteriormente, si se presentan las condiciones favorables.

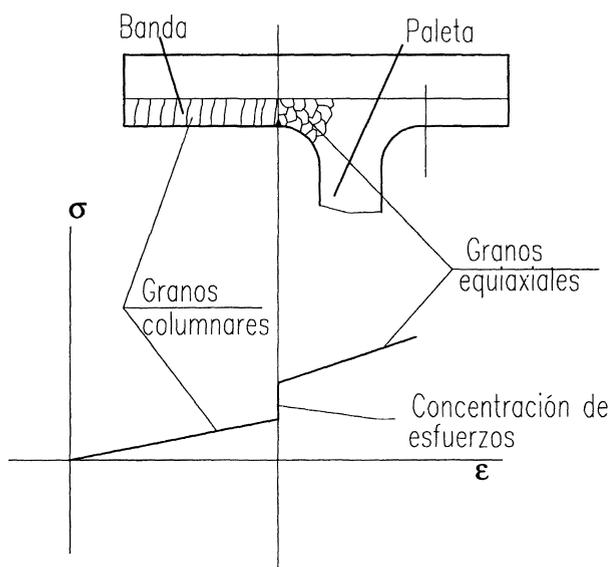


FIG. 13.— Concentración de los esfuerzos en la zona de transición de los granos equiaxiales a granos columnares en la banda integrada del álabe.

FIG. 13.— Stress concentration in the transition zone of the equiaxed grains to columnar grains of the blade tip shroud.

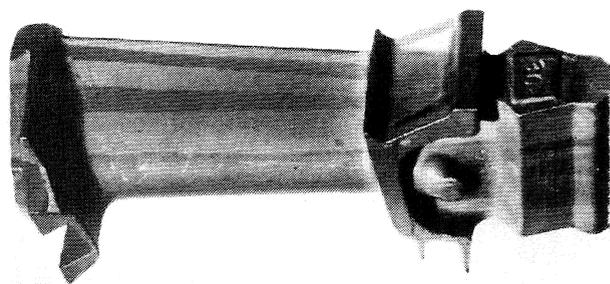


FIG. 14.— Estructura de los granos en el álabe fabricado por el proceso de vaciado de solidificación direccional (granos columnares).

FIG. 14.— Grains structure in the blade manufactured by directionally solidification casting process (columnar grains).

Esto es especialmente cierto en el caso de los álabes móviles de tamaño grande (últimas etapas de turbinas de gas) donde se desarrollan esfuerzos significativos de contacto entre las bandas de álabes y que junto con la presencia de algunos elementos que elevan los esfuerzos y aceleran la manifestación de la falla (como picaduras de corrosión, cavidades de erosión, rozamiento, inclusiones, poros del proceso de vaciado, etc.), se pueden iniciar y propagar las fisuras-fracturas en las bandas que conducen a la falla de la turbina.

Las fallas de los álabes móviles con la banda integrada en el extremo de la paleta no son hechos poco frecuentes. En varios talleres de reparación de las partes de turbinas de gas se pueden encontrar los álabes con las fallas (fisuras) en las bandas. No se puede predecir la causa de estas fallas sin una detallada investigación de todos los elementos involucrados, pero tomando como base los elementos anteriormente presentados se puede suponer con mucha probabilidad, que una parte importante de los problemas en las bandas de los álabes está relacionada con los procesos de vaciado a través de los tipos de granos formados en la banda, su tamaño, distribución y número.

Los álabes fabricados por el proceso de vaciado de grano único no presentan los problemas en la banda anteriormente mencionada, pero su alto costo de fabricación, hace que la aplicación de este tipo de proceso justifique económicamente sólo para los álabes móviles de la primera etapa, donde la temperatura de trabajo es más alta. Los álabes monocristalinos permiten obtener una superior eficiencia en la turbina de gas y competitiva con otros diseños de los álabes (granos equiaxiales, granos columnares).

Uno de los métodos para evitar la estructura de granos columnares en la pequeña sección de la banda de los álabes fabricados por el proceso de

granos equiaxiales es incrementar el espesor de la banda durante el proceso de vaciado y después mecanizarlo a las dimensiones según el diseño.

También para obtener los dos tipos de granos (equiaxiales y columnares) puede utilizarse el método de unión por difusión de las bandas con el extremo de la paleta del álabe, dando lugar al material y a la microestructura (tipo y tamaño de los granos) más adecuada para condiciones de trabajo de la banda.

4. CONCLUSIONES

La microestructura y morfología de los granos desempeñan un papel primordial en la iniciación y propagación de la falla en los álabes móviles de turbinas de gas con la banda integrada al extremo de la paleta del álabe.

La microestructura de un álabe con la banda integrada obtenido por el proceso de vaciado convencional (granos equiaxiales) es variable entre diferentes partes del álabe y es predeterminada por su tamaño y geometría, por sus propiedades físicas de la aleación, sus propiedades térmicas del molde y por las temperaturas del proceso de vaciado.

Para evitar una microestructura no adecuada de granos columnares que intersectan todo el espesor de la banda y reducir la probabilidad de desarrollo de la falla en la banda integrada de los álabes móviles de turbinas de gas, el proceso de vaciado convencional debe ser modificado (vaciado con la banda gruesa y con el siguiente mecanizado a las dimensiones finales).

También se puede utilizar el método de unión por difusión entre la banda y la paleta del álabe, para obtener el tipo de material y la microestructura adecuados para las condiciones de trabajo de la turbina (tipo y tamaño de los granos).

NOMENCLATURA

K_m	Conductividad térmica.
r	Radio interno del molde.
a	Espesor de la pared del molde.
w	Espesor del metal solidificado (razón de crecimiento).
V_I	Razón de solidificación.
G_L	Gradiente de temperatura del metal líquido.
Θ	Orientación (ángulo) de los granos columnares.
E	Módulo de elasticidad.
E_c	Módulo de elasticidad de los granos columnares.
E_e	Módulo de elasticidad de los granos equiaxiales.
σ	Esfuerzos mecánicos principales.
$\Delta\sigma_c$	Esfuerzos mecánicos en granos columnares.
$\Delta\sigma_e$	Esfuerzos mecánicos en granos equiaxiales.
$\Delta\sigma_t$	Esfuerzos térmicos.
ε	Elongación unitaria relativa.
$\Delta\varepsilon$	Rango de deformación total.
F	Fuerza cortante.
L	Brazo del momento de flexión.
α	Coefficiente de expansión térmica lineal.
Δ_T	Gradiente de temperatura del metal sólido.
T_L	Temperatura líquida.
T_S	Temperatura sólida.

REFERENCIAS

- (1) MCLEAN, M. Directionally Solidified Materials for High Temperature Service, The Metals Society 1983, London, ISBN 090435752X.
- (2) FLEMINGS, M.C. Solidification Processing, 1974, Ed. McGraw Hill. New York.