

TURBINAS

Funcionamiento y Características de Diferentes Tipos 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.

Las turbinas, de acuerdo con la dirección de la corriente fluida, pueden ser:

— Centrípetas, llamadas también radiales, trabajan al revés que el compresor centrífugo, pues en estas el flujo de gas entra desde la periferia hacia el centro de la turbina.

Turbina centripeta de alabes curvos

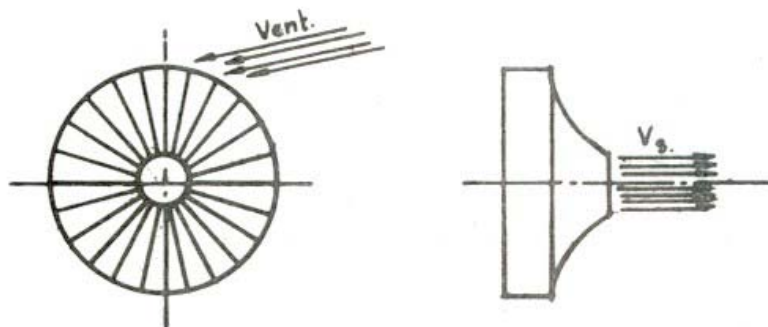


Turbina centripeta de alabes rectos



Fig. 6-1

La turbina centripeta está constituida por un estator, que actúa a modo de tobera, es decir cambiando su presión por energía cinética, y un rotor que la transformará en energía mecánica.



Flujo del gas en una turbina centripeta

Fig. 6-2

Por la forma de trabajar de la corriente fluida y la disposición de los elementos del rotor de reacción, las turbinas centrípetas no son adecuadas para los motores de reacción para producir reacción en el chorro de gases, y por ello, su utilización queda reservada a instalaciones de equipos de tierra o de abordo, ajenas a la propulsión del avión.

— Axiales, en estas, la dirección de la corriente es paralela al eje, y el estator está formado por una corona de álabes fijos al cárter, con un ángulo tal que canalizan el fluido hacia el rotor en la dirección mas efectiva para la transformación de la energía cinética en mecánica. El rotor de una turbina axial consiste de una o varias ruedas de álabes anclados a un disco que gira a alta velocidad por la acción del fluido transmitiendo energía al eje del compresor, del que se obtiene además la energía para el movimiento de accesorios.

Las turbinas en todos los motores de reacción modernos, sin tener en cuenta el tipo de compresor utilizado, son de diseño de flujo axial. Las turbinas consisten en una o mas etapas o escalones situados inmediatamente detrás de la sección de cámara de combustión del motor.

Un escalón de turbina está formado por dos componentes fundamentales: el estátor y el rotor, situados en el motor en el orden enunciado de la admisión al escape; es decir, en sentido inverso al de un escalón de compresor.

El salto de presión por escalón es aproximadamente del mismo orden de magnitud, tanto en las centrípetas como en las axiales, si bien estas son mas apropiadas para grandes gastos.

El estátor de una turbina, ya sea centrípeta o axial actúa a modo de tobera. En el caso de las turbinas centrípetas, la configuración del estátor y del rotor es similar al de un compresor centrífugo, en donde el fluido pasa en sentido inverso. En el caso de una turbina axial, como se ha dicho, el estátor está formado por una cascada de álabes fijos al cárter, con un ángulo tal que canalizan el fluido hacia el rotor en la dirección más efectiva para la transformación de la energía cinética en mecánica. El rotor de una turbina axial consiste en una o varias cascadas de álabes unidos a un disco que gira a alta velocidad por la acción del fluido, transmitiendo la energía al compresor mediante el eje común turbina – compresor, del que se extrae además la energía para el arrastre de accesorios.

Por la forma de trabajar de la corriente fluida y la disposición de los componentes del motor de reacción, las turbinas centrípetas no son adecuadas para estos motores, y por ello, su utilización queda reservada a instalaciones de equipos de tierra o de abordo, ajenas al funcionamiento del motor de reacción.

Las turbinas axiales han adquirido un amplio desarrollo con la técnica aeronáutica de la propulsión por reacción, debido principalmente al gran caudal de gas que pueden admitir.

Las turbinas axiales pueden ser de dos tipos dependiendo del diseño básico de sus álabes:

— Turbinas de impulso o de acción.

— Turbinas de reacción.

Grado de Reacción de una Turbina

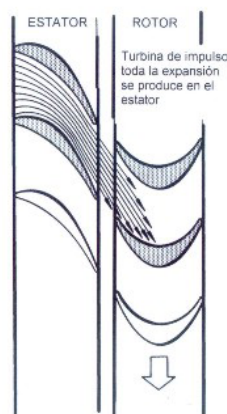


Fig. 6-3

Se llama grado de reacción de una turbina, al cociente de dividir el salto de presión dado en el rotor, entre el salto de presión dado en el conjunto estátor – rotor.

Turbina de Impulso

Las turbinas de impulso (Fig. 6-3), llamadas también de acción o de presión constante, son aquellas de grado de reacción cero, lo que significa físicamente que toda la expansión del gas tiene lugar en el estátor que actúa en forma de tobera. Como resultado de esta expansión en el estátor, la velocidad del fluido aumenta considerablemente, actuando sobre los álabes del rotor, que adquieren una velocidad de rotación en la dirección de los estrados de los álabes. La sección de paso entre los álabes de roto es constante.

El descenso de presión en el estátor se produce con rapidez y suavidad hasta la presión requerida, a cuyo valor se mantiene constante durante el paso a través de los álabes de rotor.

Al paso del gas por la superficie curvada de los álabes del rotor, cambia la dirección de la corriente fluida, y en el caso de un solo escalón o en el último de varios escalones, la velocidad absoluta de salida es sensiblemente paralela al eje de dicho rotor, haciendo así coincidir la velocidad absoluta de salida del escalón, con la axial o de entrada a la tobera de escape del motor.

Cuando solo se utiliza un solo escalón de turbina, las velocidades del rotor son muy elevadas, con la consiguiente desventaja de alta fuerza centrífuga; por eso en muchos casos la caída de presión se realiza a través de varios escalones de estátor, intercalados entre los álabes montados en los discos correspondientes a un solo rotor. Este tipo de turbina se llama del tipo "compound".

Pueden existir mas de dos estrellas de álabes por cada rotor, si bien no es corriente sean más de dos, porque las pérdidas por fricción son entonces muy elevadas. El uso de un rotor con discos múltiples, favorece desde el punto de vista de operar con menos r.p.m., pues la energía cinética transformada en mecánica está distribuida de esta manera en los distintos discos.

Dado que a la vez que en el estátor tiene lugar una gran caída de presión, aparece un descenso considerable de temperatura, pues resulta que para igual descenso de presión, la temperatura de los álabes de un escalón de turbina simple es menor que la temperatura de los álabes del primer escalón de una turbina de escalones múltiples, debido al hecho de que el descenso de presión en el primer conjunto estátor – rotor, en la de escalones múltiples, no es completo. Por esta razón, si la temperatura es muy elevada, en lugar de utilizar escalones múltiples de turbinas de impulso, suelen utilizarse turbinas de determinado grado de reacción, o también se puede utilizar un primer escalón de impulso combinado con otro u otros escalones de reacción.

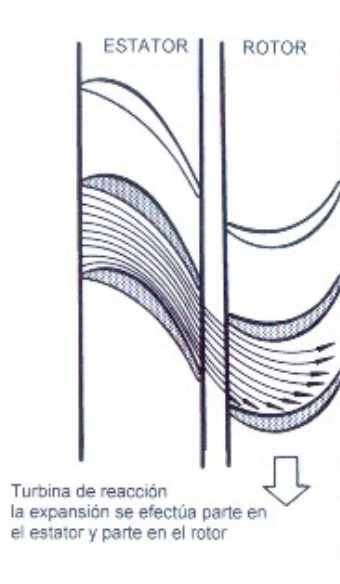


Fig. 6-4

Turbinas de Reacción

Son aquellas cuyo grado de reacción es mayor que cero. El significado físico de que el grado de reacción tenga un determinado valor, es que parte de la expansión se efectúa en el estátor y parte en el rotor.

Al paso del fluido por el estátor se produce una caída parcial de presión y un aumento de velocidad, esto es, el estátor, como en el caso de las turbinas de impulso, funciona como una tobera y al llegar el fluido al rotor, continúa la caída de presión.

De la misma forma que en la turbina de impulso, el cambio de dirección de la velocidad relativa del fluido respecto a los álabes, origina el movimiento de rotación. En el caso de las turbinas de reacción, no solo cambia la dirección de la velocidad relativa al paso entre los álabes, sino que aumenta, cosa que no ocurre en las turbinas de impulso, en las que solamente existe cambio de dirección, pero manteniéndose constante su magnitud.

En este caso pues, también los álabes del rotor forman un paso convergente similar al de una tobera de régimen subsónico.

Es frecuente utilizar un rotor con varios discos de álabes como en el caso de las turbinas de impulso, produciéndose la caída de presión en varios escalones.

Turbinas de Impulso – Reacción

Estos tipos de turbina pueden combinarse por diseño de los álabes, tanto del estátor como del rotor, para formar una turbina mixta de impulso y reacción, obteniéndose de esta forma características que corresponden sensiblemente al 50% de cada tipo.

La forma óptima de este tipo de turbina corresponde a la utilización del tipo de impulso en la raíz del álabe, y del tipo de reacción en el extremo. En estas condiciones, la variación de presiones del gas, desde la raíz del álabe al extremo, varía con la siguiente ventaja de funcionamiento: la mayor presión del gas en la zona del extremo del álabe, reduce el escape de gas que tiende a producirse por fuerza centrífuga hacia la periferia, resultando de esta forma un álabe de más rendimiento.

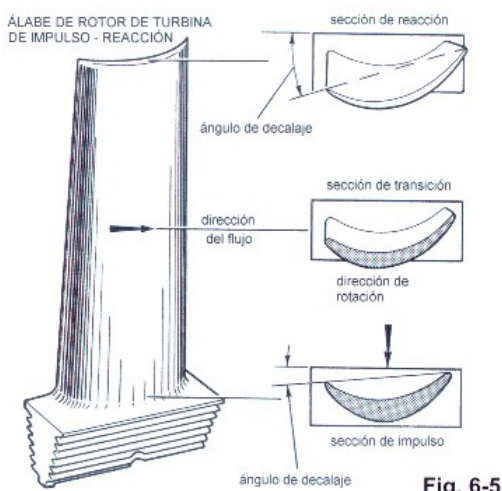


Fig. 6-5

La ventaja funcional apuntada, puede mejorarse aún más, utilizando álabes apoyados en el extremo, pues de esta forma el rotor de turbina puede girar más cerca del cárter, con la consiguiente reducción de pérdidas de gas fuera de la zona de turbina. Esto, y la reducción de vibración en los álabes con este dispositivo, lo han hecho de mucha utilización. Sin embargo, existe un inconveniente en este tipo de apoyo de álabes, y es que impone una reducción en la temperatura de entrada del gas a la turbina, pues la acción de la fuerza centrífuga de la masa adicional de apoyo del álabe en el extremo, aumenta los esfuerzos que por fuerza centrífuga se producen a lo largo de todo el álabe, y que son máximos en la raíz.

La temperatura y los esfuerzos pueden ser críticos en la resistencia del álabe, por esto, en motores que trabajan a elevadas temperaturas de entrada a la turbina, no se utiliza este dispositivo. Una solución es utilizar el primer rotor con álabes no apoyados en el extremo, y así en los siguientes que trabajan a menor temperatura.

Anclaje del álabe al disco

El método de fijación de los álabes al disco de turbina es de considerable importancia, puesto que los esfuerzos en el disco alrededor de los anclajes o en la raíz del álabe son a tener en cuenta en la limitación de la velocidad periférica. El método usado en la mayoría de los motores es el llamado "copa de abeto". Este tipo de anclaje conlleva un mecanizado muy preciso para garantizar que la carga se reparta por todo el contorno en forma de abeto. El álabe está libre en su alojamiento cuando la turbina se encuentra estacionaria y tenso en su raíz por la carga centrífuga cuando la turbina está girando.

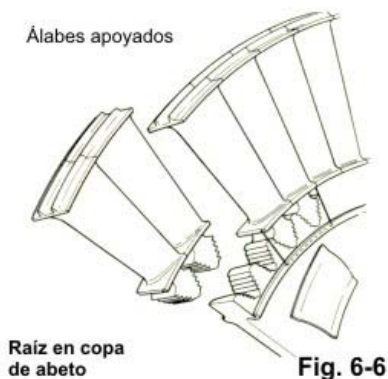


Fig. 6-6

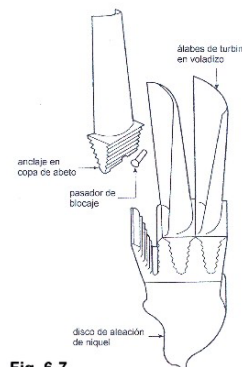


Fig. 6-7

Existen algunos álabes que en su punta tienen una plataforma, que al montar toda una rueda de álabes constituye un anillo. A estos se les denomina, álabes apoyados; cuando carecen de dicha plataforma se les denomina álabes en voladizo.

Álabes Guías de Entrada en Turbina

Para poder realizar trabajo, los gases calientes procedentes de la cámara de combustión deben procesarse adecuadamente. Esta es la misión de los álabes guías de entrada en turbina, cuyas funciones principales son dos. Primero, deben convertir parte de la energía de los gases calientes en energía cinética para acelerar el flujo lo suficiente cuando incida sobre los álabes de rotor. Segundo, los álabes guías de entrada en turbina deben cambiar la trayectoria del flujo de gas de tal manera que las fuerzas engendradas en los álabes de la turbina se transformen en potencia para el eje.

La aceleración necesaria se consigue estrechando el paso entre los álabes adyacentes (efecto tobera). A medida que la velocidad aumenta, la presión estática y la temperatura disminuyen. El grado de conversión de esta energía depende de la relación entre el área de entrada a los álabes guías de turbina y el área de salida de los mismos, lo cual es función directa del tipo de álabes de turbina usados.

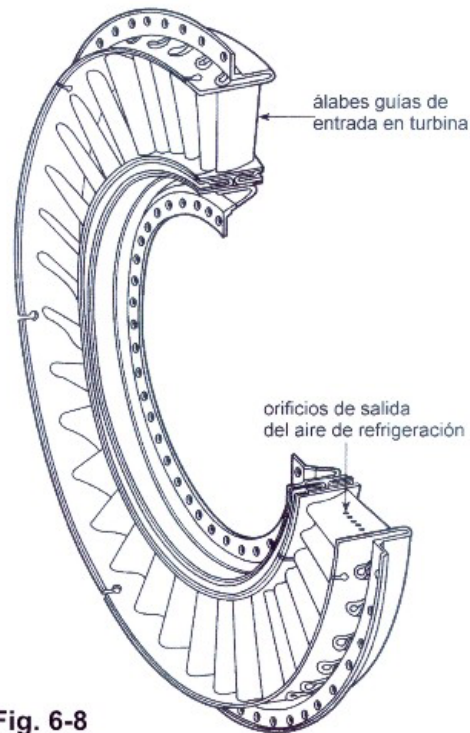


Fig. 6-8

Un anillo de álabes guías de entrada en turbina, o toberas, se monta entre la descarga de la sección de combustión y la primera etapa de turbinas. Este forma una serie de pasos convergentes que aumentan la velocidad y disminuyen la presión de los gases, al tiempo que los dirige de manera que incidan sobre los álabes de turbina con el ángulo óptimo para el máximo rendimiento.

Cuando el motor está produciendo potencia entre crucero y despegue, los gases que fluyen a través de los pasos entre los álabes fijos de turbina se están moviendo a la velocidad del sonido, y la tobera está operando en condición de estrangulada, evitando cualquier incremento posterior de la velocidad de los gases. Dado que los gases ya no pueden acelerar más, estos producen una contrapresión mayor que la presión detrás de la turbina. Esta condición de estrangulada origina un flujo de gases relativamente constante a través de la turbina.

Puesto que la velocidad del sonido depende de la temperatura del aire, la velocidad de los gases que fluyen a través de una tobera estrangulada depende de su temperatura. Es decir cuanto mayor es la temperatura, menor es la velocidad del sonido.

Álabes de Estátor de Turbina

Los álabes de estátor son en forma de perfil aerodinámico. Los álabes fijos están localizados en el cárter de turbina de tal manera que puedan permitir la dilatación.

Los álabes de estátor tienen como misión acelerar la corriente fluida, y canalizarla para descargar con el ángulo óptimo que exija la velocidad del rotor; la forma y posición de los álabes de estátor deberá ser tal que actúen en forma de tobera, y siendo la corriente de entrada subsónica, pueden admitir dos configuraciones:

Formando un conducto convergente – divergente, cuando se desea una elevada caída de presión en el estátor.

Formando un conducto convergente, cuando la caída de presión en el estátor sea pequeña. Según esto, el estátor convergente – divergente es apropiado para turbinas de acción, en donde toda la expansión ocurre en el estátor, en tanto que para las turbinas de reacción, tomará forma convergente, dado que la expansión en el estátor es solo parcial.

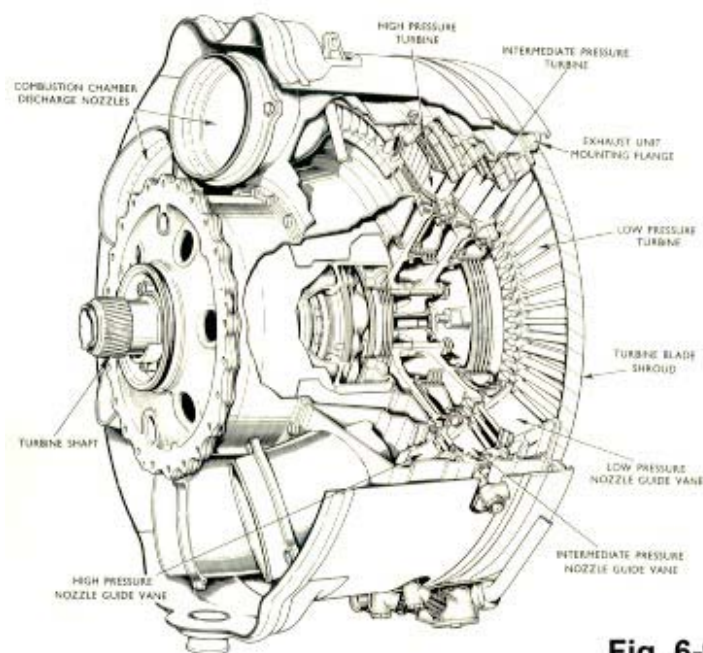


Fig. 6-9

Como ya hemos dicho antes el estator de turbina tiene entre otras misiones la de acelerar la corriente, haciéndola lo más alta posible antes de llegar al rotor, esta velocidad es un poco inferior a Mach 1 ya que si rebasáramos este valor tendríamos fenómenos en los que disminuiría el rendimiento.

La alimentación del estator de turbina al tener que ser uniforme, nos impone en el caso de combustión de tipo separada, de disponer de mangas de unión entre la salida de las cámaras y el estator. En efecto, hay que agrupar las venas fluidas circulares que salen de las cámaras individuales en una sola vena de sección anular, problema que no se presenta en el caso de una cámara anular.

El estator está constituido por dos aros concéntricos entre los cuales están dispuestos los conjuntos de álabes fijos.

Estos conjuntos de álabes hechos con una mezcla refractaria pueden ser macizos hechos por fundición o vacíos de chapa conformada o soldada. Se fijan entre los aros exterior e interior de

diferentes maneras: soldados en las dos extremidades, soldados en la base sobre un aro interior pero libres de desplazarse en el exterior (dilatación), etc.

Todos estos órganos están sometidos a temperaturas elevadas, pero a cargas mecánicas también moderadas. No teniendo que soportar esfuerzos centrífugos, la resistencia mecánica no tiene una importancia primordial y es interesante el utilizar unas aleaciones de fundición de diferentes tipos en su fabricación, tales como el Nimonic 90 y 80 y la llamada Vitalium, que contiene de 0'11 a 0'25 % de carbono, del 28 al 32 % de cromo, del 5'5 al 6'5 % de molibdeno y el complemento de cobalto.

Los álabes de estátor de turbina normalmente son huecos y pueden refrigerarse haciendo pasar aire procedente del compresor a través de ellos para reducir los altos esfuerzos térmicos y las cargas del gas. La vida de los álabes de turbina dependerá en gran parte de la forma de refrigeración del álabes, por lo tanto, el diseño de los pasos internos del flujo de aire en los álabes es de suma importancia.

Causas y Efectos del Esfuerzo en los Álabes de la Turbina y Deformación.

Algunos de los puntos a considerar en conexión con el diseño de los álabes de turbina darán una idea de la importancia de la temperatura de entrada en turbina que soportan estos componentes. Los álabes al ponerse al rojo vivo, deben ser lo suficientemente fuertes para soportar las cargas centrífugas debidas a la rotación a gran velocidad. Un álabes que pese solo dos onzas (56'7 gramos) puede ejercer una carga de más de dos toneladas a máxima velocidad, y debe soportar las altas cargas de torsión aplicadas por el gas para producir los muchos miles de caballos de potencia en la turbina necesarios para arrastrar al compresor. Los álabes también deben resistir la fatiga y el efecto térmico, o termofluencia, que es una disminución acusada de la resistencia con la temperatura de funcionamiento, de manera que no fallen bajo la influencia de las fluctuaciones de alta frecuencia en las condiciones del gas, y también deben ser resistentes a la corrosión y a la oxidación.

A pesar de todas estas exigencias, los álabes deben estar hechos de un material que puedan conformarse y mecanizarse con exactitud por los métodos normales de fabricación.

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.

Junto con los grandes progresos en el incremento de la TIT permisible por medio de la refrigeración de los álabes de turbina, los avances metalúrgicos en nuevos materiales y procedimientos de fabricación de los álabes han resultado en aumentos adicionales de la temperatura permisible. La cerámica potencialmente ofrece muchas mejoras.

Uno de los avances tecnológicos que han aumentado la temperatura permisible en la turbina es la fabricación del álabes con un metal de un solo cristal. Se ha demostrado que muchos de los fallos del álabes de turbina en la actualidad han estado relacionados con la cohesión intergranular del metal con el que se ha fabricado el álabes. Las nuevas tecnologías han permitido que los álabes de turbina se fabriquen de un metal monocristal. Esto evita todas las limitaciones del grano y permite una temperatura de entrada mucho más alta con su correspondiente aumento del rendimiento.

Para las turbinas de los turborreactores, la investigación metalúrgica en este campo es incesante, siendo de destacar la utilización de aleaciones que tienen su origen en la composición binaria Níquel – Cromo, con porcentajes aproximados de 80% de Níquel y 20% de Cromo.

Construcción

Los componentes básicos de la turbina son los álabes guías de descarga de cámara en turbina, los álabes de estátor de turbina, los discos de turbina y los álabes rotatorios de turbina. El conjunto de rotación está apoyado sobre cojinetes montados en los cárteres interiores del motor, y el eje de turbina puede ser común con el eje del compresor o estar conectado a este por un acoplamiento.

El disco de turbina

El disco de turbina trabaja con una gran diferencia de temperatura entre su periferia y su centro. A estos esfuerzos térmicos se añaden los producidos por la fuerza centrífuga, las grandes vibraciones y los efectos giroscópicos.

La acumulación de estos esfuerzos no debe producir mas que deformaciones mínimas, compatibles con el juego permitido entre el conjunto compresor – turbina y el cárter. Es pues necesario emplear un metal que tenga un alto límite elástico para evitar todo el alargamiento plástico que pueda crear deformaciones permanentes aumentando el diametro del disco.

Para su construcción se emplea aceros ferrosos para rotores, aceros austeníticos a veces a base de níquel, cromo, molibdeno, cromo – molibdeno con o sin vanadio. Y mas raramente mezclas refractarias del tipo Nimonic 90.

El disco de turbina es de forja mecanizado con un eje integral o con una pestaña sobre la cual el eje puede atornillarse. El disco alrededor de su perímetro tiene alojamiento para el anclaje de los álabes de turbina.

Para limitar el efecto de la transmisión de calor desde los álabes de turbina al disco se hace pasar un flujo de aire de refrigeración a través de ambas caras del disco.

Un desarrollo reciente en la fabricación de turbinas para motores pequeños de turbina de gas es mecanizar una rueda de turbina entera de una sola plancha de Nimonic, fabricando el disco y los álabes en una unidad integral llamada *blisk*

Álabes de turbina

De perfil aerodinámico muy estudiado cuyo propósito es proporcionar pasos entre los álabes adyacentes que den una firme aceleración del flujo hacia la “garganta”, donde se encuentra el área más pequeña y la velocidad alcanza la requerida en la salida para producir la expansión o caída de presión que se define por el grado de reacción necesario resultante de la aceleración del gas a través de estos pasos, deben ser calculados de tal manera que puedan soportar grandes cargas, esfuerzos térmicos elevados y ser insensibles a los fenómenos vibratorios. Obligatoriamente están hechos de mezclas refractarias. Las mas utilizadas son las Nimonic. El Nimonic 80 es esencialmente de tipo níquel cromo 80/20 reforzado por la precipitación de un compuesto de níquel, titanio y de aluminio. Los Nimonic 90 y 95 diferentes de la mezcla preferente, porque contienen una cierta proporción de cobalto que disminuye la del níquel. El Nimonic 90 puede soportar temperaturas del orden de 870 a 900° C y el Nimonic 95 que contiene una proporción muy elevada de elementos que lo endurecen, presenta mejores propiedades aún. El Nimonic 100 de composición más compleja es para elementos cuya temperatura alcanza los 1000° C. Además de su capacidad para resistir a la deformación bajo la acción de tensiones centrífugas y esfuerzos de flexión a las temperaturas elevadas, estas aleaciones resisten bien a la oxidación y poseen también buenas propiedades de resistencia a la fatiga.

El Eje de Turbina

El eje de turbina asegura la unión entre el rotor de turbina y el buje trasero del compresor; se compone por uno, dos o tres palieres según los tipos de motor.

Los discos de turbina y su eje están contruidos separadamente con aceros de propiedades diferentes al estar los discos de turbina sometidos a esfuerzos térmicos y dinámicos distintos a los del eje.

El eje de turbina se construye generalmente mediante forja, es hueco y suele estar hecho de acero poco aleado pero con estructura muy dura.

El ensamblaje del conjunto rotor – eje de turbina se realiza según diversas técnicas, en algunos motores las dos piezas están unidas por soldadura con un acabado tal que no subsiste en ella ninguna huella cuando el conjunto está terminado. En otros, la unión del rotor de turbina y su eje es por medio de tuercas y pernos de fijación, y otros usan sistemas de acoplamiento estriado.

Equilibrado

Debido a la gran velocidad rotacional, cualquier desequilibrio en el conjunto rotatorio de un motor de turbina de gas es capaz de producir vibración y esfuerzos que aumentan según el cuadrado de la velocidad de rotación. Por lo que es necesario un equilibrado preciso de los conjuntos rotatorios.

Los dos métodos principales de localización de fuerzas en desequilibrio son el equilibrado estático y el equilibrado dinámico. Con el primer método es posible localizar y corregir desequilibrios en solo un plano. Sin embargo, debido a la longitud del conjunto compresor – turbina, el desequilibrio puede estar presente en cualquier posición radial y axial, y cuando el conjunto está girando, esto producirá fuerzas centrífugas desiguales que actúan sobre los cojinetes en los extremos del rotor. Para contrarrestar estas fuerzas, las correcciones se aplican en dos planos, normalmente a cada extremo del conjunto.

Control de la holgura en la punta de los álabes

Algunos motores modernos turbofanés de gran potencia controlan las pérdidas en las puntas de los álabes de turbina por medio de un control activo de la holgura (ACC). Esto se hace soplando una corriente de aire frío procedente de la descarga de fan a través de unos orificios alrededor de los cárteres de turbina cuando el motor está desarrollando potencia de despegue. Este aire frío reduce el cárter alrededor de la turbina disminuyendo las pérdidas por las puntas de los álabes, y aumentando el rendimiento térmico del motor. El ACC está controlado por el control electrónico digital de plena autoridad (FADEC), el cual trataremos mas adelante.

Refrigeración de la Turbina

El primer factor que limita la cantidad de potencia que un motor de turbina de gas puede producir es la temperatura máxima que puede ser tolerada a la entrada de la turbina. A esto se le llama temperatura de entrada en turbina (TIT).

Algunos motores modernos han aumentado el rendimiento térmico debido a una permitida TIT aumentada, y una forma de hacer esto es enfriando los álabes guías de entrada en turbina y el primer escalón de álabes de rotor.

La refrigeración de la turbina se consigue haciendo fluir aire sangrado del compresor a través de álabes guías de entrada en turbina huecos y de los álabes de rotor. El aire deja la superficie del álabes guía a través de unos orificios especialmente preparados de manera que forma una película de aire sobre el álabes para aislar a la superficie de los gases calientes. La Figura 10-72 muestra la sección transversal de dos álabes de turbina a través de los cuales el aire de refrigeración fluye para aumentar la TIT permisible.

El aire usado para el sistema de refrigeración de turbina se sangra de una de las últimas etapas del compresor, y aunque su temperatura es mayor de 1.000 ° F, es bastante mas fría

que la de los gases que arrastran a la turbina. Este aire fluye a través de los álabes hueco y sale con los gases de escape.

Solo es necesario refrigerar los álabes guías de entrada en turbina y la primera etapa de álabes rotatorios de turbina. Los gases pierden bastante energía cuando pasan la primera etapa como para que su temperatura caiga dentro de la gama permitida para las etapas sucesivas.

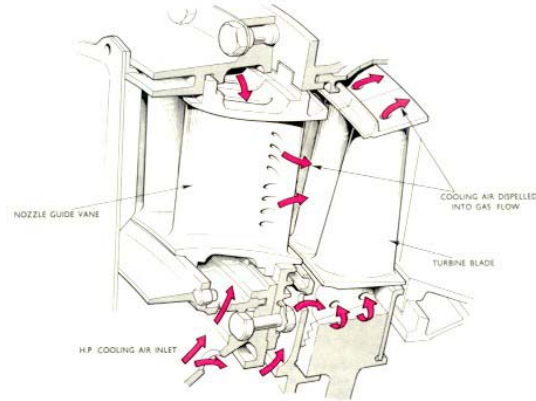


Fig. 6-10 Refrigeración de los álabes guías y del primer escalón de turbina