

Los materiales: Espina dorsal de los motores a reacción

DAVID REDONDO BENITO DEL VALLE, Ingeniero Aeronáutico

INTRODUCCION: DEL MOTOR DE EMBOLO AL TURBOFAN

Los motores alternativos han sido, desde el primer vuelo de los hermanos Wright en 1903 hasta el fin de la Segunda Guerra Mundial, la planta de potencia predominante en los aviones civiles y militares, y aún mantienen su preeminencia en el mercado de la aviación ligera. Es significativo que desde el primer momento el desarrollo de la aviación ha ido ligado íntimamente con el de los materiales, como lo indica el hecho de que los hermanos Wright utilizaran un bloque de aluminio para su motor, obteniendo una relación peso/potencia de 15 libras por caballo, lo que les permitió remontar el vuelo por vez primera.

Asimismo, el desarrollo de materiales para su utilización en los motores de émbolo de altas prestaciones de la Segunda Guerra Mundial, así como para los turbocompresores que permitieron mayores velocidades de vuelo y mantener la potencia a mayores altitudes, posibilitó la construcción de los primeros motores a reacción. Tanto las aleaciones de aluminio para pistones, como los aceros empleados en cigüeñales, y las superaleaciones usadas para recubrimientos en asientos de válvulas de escape, tuvieron utilización en los primeros diseños de motores a reacción.

El desarrollo de los materiales ha sido incesante desde aquellos días, permitiendo la construcción de motores cada vez más potentes, eficientes y ligeros, hasta llegar a la situación actual, que presenta un abanico de posibilidades como nunca habría soñado un ingeniero de materiales, que puede elegir entre los nuevos materiales compuestos de matriz orgánica o metálica, las aleaciones metálicas de alta tecnología, y los aún más nuevos materiales cerámicos.

El acelerado desarrollo de los turborreactores

La progresión de los motores en cuanto a peso específico (peso/empuje), consumo específico (consumo/empuje) y empuje de despegue ha sido espectacular ("sky rocketing" en inglés) como se puede apreciar en la figura 1. Comparado con el motor Whittle W1, que desarrollaba unas 1.000 lb de empuje, los motores actuales llegan a desarrollar 50 veces más empuje. Por otro lado, como se aprecia en la figura citada, el peso y el consumo específicos han sufrido considerables reducciones, siendo actualmente del orden de la mitad que en los años 50.

Estas mejoras en los motores han sido posibles (además de por mejoras de diseño que han aumentado la eficacia de los componentes) por un notable incremento en las temperaturas de funcionamiento y en la relación de compresión (ver figuras 2 y 3). La utilización de aleaciones más ligeras, como el titanio, y más resistentes a alta temperatura, ha acompañado esta mejora de las prestaciones de los motores (ver figuras 3 y 4).

SELECCION DE MATERIALES PARA UN MOTOR: EXIGENCIAS DE DISEÑO Y SOLUCIONES ACTUALES

Las extremas condiciones de presión y temperatura en que trabajan las piezas de un motor a reacción, así como la continua exigencia de aumentar su empuje y de reducir el peso y consumo, sin comprometer la fiabilidad y durabilidad del sistema, obligan a hacer una selección muy cuidadosa de los materiales a emplear en cada parte del motor, por ello pasaremos una rápida revista a los requisitos de diseño de algunas de las piezas principales del mismo, según las distintas zonas del motor en las que trabajan (ver figura 5).

Alabes del compresor

Los álabes móviles deben soportar esfuerzos centrífugos muy altos a temperaturas progresivamente mayores, como se aprecia en la figura 2; esto, unido a una buena resistencia a la fatiga, resistencia a la erosión y al impacto de objetos extraños (especialmente en los álabes de fan), obliga a utilizar materiales de alta resistencia específica (alta resistencia y densidad baja) y módulo elástico específico (rigidez) alto. Por ello se utilizan álabes de duraluminio (tipo 2014) y aleación de titanio α - β (tipo Ti-6Al-4V) en los primeros escalones del compresor, pero según va incrementándose la temperatura se usan otras aleaciones de titanio, como la Ti-8Al-1Mo-1V (tipo casi- α), o la Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo (tipo casi- α), y en los últimos escalones es necesario utilizar superaleaciones como la A-286 (base hierro) o Inconel 718 (base níquel).

Los álabes fijos del compresor no están sometidos a los esfuerzos centrífugos de los giratorios, por lo que la exigencia de ligereza es menor; como por otro lado no es conveniente colocar álabes contiguos de titanio, por el peligro de incendio provocado por un roce incidental en piezas de este material, se suelen fabricar bien de aleación de aluminio 6061 ó 2014 en los primeros escalones, o de aceros inoxidables martensíticos tipo AISI 410 o Greek Ascology en las siguientes, utilizando en los últimos escalones del estátor superaleaciones de níquel como la Inconel X750.

Discos del compresor y de la turbina

Las condiciones de trabajo de los discos tanto del compresor como de la turbina exigen de ellos una fiabilidad absoluta, pues pequeños deterioros o incluso grietas que en otras partes del motor pueden ser soportadas dentro de ciertos límites, en los discos dan lugar a fallos que pueden ser catastróficos.

La energía almacenada por el conjunto rotatorio de alta presión es muy elevada, por ejemplo en el

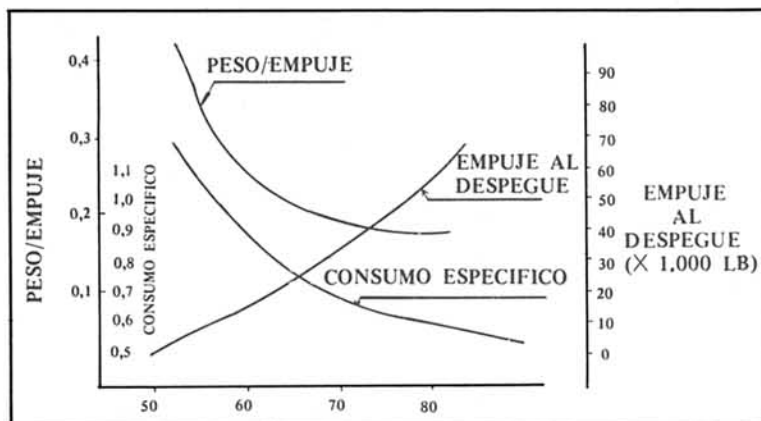


Figura 1. Tendencias del peso, consumo específico y empuje en motores a reacción civiles

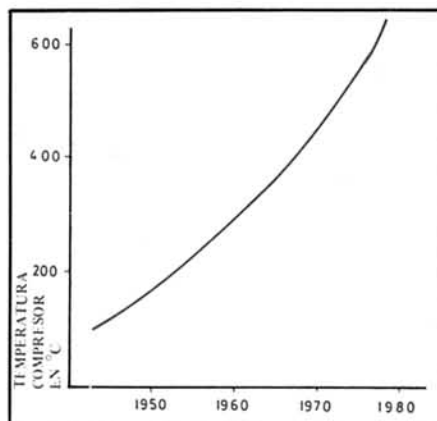


Figura 2. Variación de la temperatura de salida del compresor con el tiempo

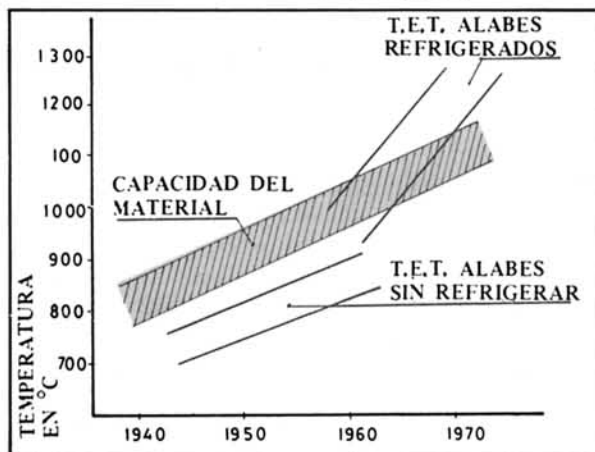


Figura 3. Contribución del desarrollo de materiales y la refrigeración de los álabes, al aumento de la temperatura de entrada a la turbina (T.E.T.)

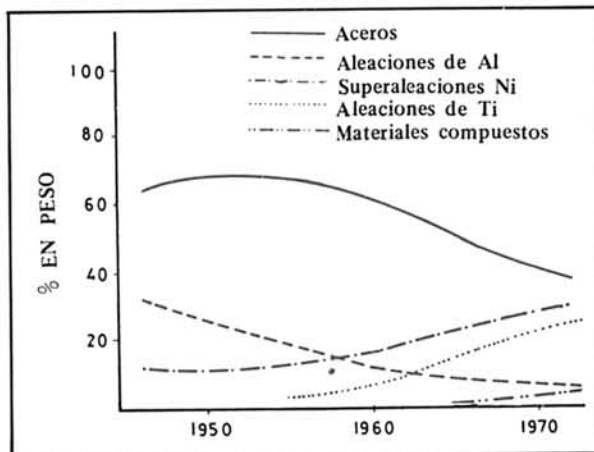


Figura 4. Tendencias en el empleo de materiales en motores a reacción

despegue el motor Rolls Royce Conway almacena en la turbina de alta presión la energía equivalente a la de un vehículo de 25 toneladas que circula a unos 50 km/h. Este primer objetivo de fiabilidad hay que conseguirlo a través de un control muy cuidadoso de la microestructura de los materiales, lo que exige unos procesos de fabricación y de verificación completamente garantizados.

Los discos se diseñan de forma que mantengan una estabilidad dimensional muy alta, con objeto de evitar el roce de la punta de los álabes, que soportan con las paredes de la carcasa envolvente. Suelen ser de mayor espesor en la parte central, donde aguantan superiores esfuerzos y la temperatura es menor, mientras que en la periferia son de menor espesor, salvo en el encastrado de los álabes, donde hay una concentración de esfuerzos.

Aunque inicialmente se utilizaran aceros inoxidable martensíticos para los discos del compresor, a partir de los años 60 fueron sustituidos totalmente por el titanio, con la excepción de los últimos escalones, donde debido a las altas temperaturas se utilizan las superaleaciones de níquel como la Inconel 718 o Merl 76.

Los discos de la turbina, fabricados inicialmente de aceros inoxidable austeníticos, pasaron rápidamente a ser de aleaciones de níquel, más resistentes a alta temperatura, utilizándose en la actualidad la técnica de la pulvimetalurgia, con el consiguiente beneficio en homogeneidad y grano fino.

Alabes de la turbina

Son estas piezas las que sin duda alguna soportan las condiciones de trabajo más duras, no sólo por las condiciones de presión y temperatura, sino porque los gases de combustión que directamente inciden sobre ellos son altamente corrosivos por la presencia de cloruros y sulfatos procedentes del queroseno. La búsqueda de mayores empujes y menores consumos ha obligado a incrementar progresivamente la temperatura de entrada a la turbina (ver figura 3); esto sólo ha sido posible:

1.º Desarrollando aleaciones que mantengan una resistencia apreciable a dichas temperaturas, a la vez que con gran capacidad de resistir los fenómenos de fluencia y fatiga térmica.

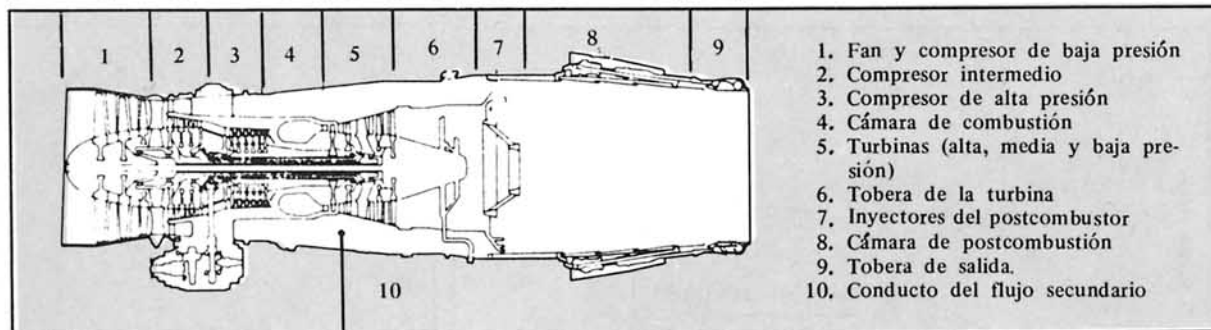


Figura 5. Conjuntos en que se divide un motor (RB 199)

2.º Protegiendo los álabes con recubrimientos metálicos anticorrosivos, principalmente basados en el sistema Ni, Co, Cromo, Aluminio, Ytrio o incluso recubrimientos cerámicos, como compuestos de Mg y Zr.

3.º Refrigerando los álabes interna y externamente creando una película de aire más frío procedente del compresor (ver figura 6).

Actualmente se utilizan en el primer escalón de álabes fijos superaleaciones de cobalto y a continuación superaleaciones de níquel, habiéndose introducido últimamente álabes monocristalinos que proporcionan una mayor resistencia mecánica a altas temperaturas, así como resistencia a la fluencia.

Cámara de combustión

En esta parte del motor los materiales alcanzan las máximas temperaturas, con un valor medio de 800°C, y llegando incluso transitoriamente a 1.000°C. Para poder soportar estas condiciones de trabajo, los materiales deben tener una óptima resistencia a la oxidación en caliente y a la fatiga térmica, además de una moderada resistencia estática y a la fluencia. A pesar de utilizarse barreras térmicas cerámicas, principalmente de Mg-Zr, pocos materiales son capaces de soportar estas condiciones; se utilizan superaleaciones de níquel, como las Hastelloy X y Haynes 188.

Cárteres

Estas piezas, además de su misión estructural de formar el armazón del motor, deben contener en su interior las partes giratorias, lo que exige por un lado tener una alta resistencia a la penetración, para el caso de desprendimiento de algún álabes, y por otro lado un ajuste perfecto con las partes giratorias, pues una holgura excesiva en el compresor causaría una reducción del margen de "surge" en las aceleraciones y en la turbina un aumento del consumo específico de combustible (un aumento del 0,1 mm en la holgura

álabes-cárter puede significar un aumento de un 0,5 por 100 en el consumo específico).

Según la zona del motor se emplean diferentes aleaciones, como aluminio (6061), titanio (Ti-6Al-4V), aceros inoxidables martensíticos (AISI 410, Greek Ascoloy) o superaleaciones (Inconel 718, René 77, Mar-M-509).

EL FUTURO DE LOS MATERIALES: EXIGENCIAS DE EFICIENCIA Y DURABILIDAD

El avance en los motores a reacción en los últimos quince años ha sido muy considerable, pero no por ello se han agotado las posibilidades de desarrollo, sino que los nuevos proyectos abarcan un amplio abanico de mejoras, tanto en actuaciones como en peso y coste del ciclo de vida. En el campo específico de los materiales y procesos de fabricación la tabla de la figura 7 muestra los objetivos hacia los que se dirige la investigación actual, junto con las líneas de trabajo que parecen más prometedoras.

Para cumplir estos objetivos propuestos, diversas tecnologías de materiales se están desarrollando, en las cuales va muy unido el diseño del nuevo material con el proceso de fabricación, interviniendo el ingeniero de materiales en las primeras fases del proyecto, junto con los estructuralistas, expertos en aerodinámica, etc. Para las partes frías del motor, capotas, carenas, sección de entrada al compresor, etc., se propone:

- Materiales compuestos bien de matriz orgánica o metálica.
- Nuevas aleaciones de titanio de alta resistencia y fácil soldabilidad.
- Nuevos sistemas de aluminio de mayor resistencia y que soporten temperaturas más altas.
- Componentes híbridos, combinando piezas metálicas con materiales compuestos.

Para las secciones de temperatura intermedia de motor, entre 300 y 700°C, se está trabajando actualmente en:

- Aleaciones de titanio de alta temperatura para álabes y discos.
- Composites de matriz metálica con rigidez y resistencia diseñada para cada pieza determinada.
- Superaleaciones mejoradas por procesos termomecánicos.

Para las partes más calientes del motor las líneas de trabajo actuales son las siguientes:

- Discos fabricados por pulvimetalurgia.
- Álaves monocristalinos.
- Materiales reforzados por dispersión de óxidos.
- Componentes cerámicos.
- Recubrimientos resistentes a la oxidación en caliente.
- Barreras térmicas cerámicas.
- Materiales compuestos para alta temperatura.
- Aleaciones de solidificación eutéctica.

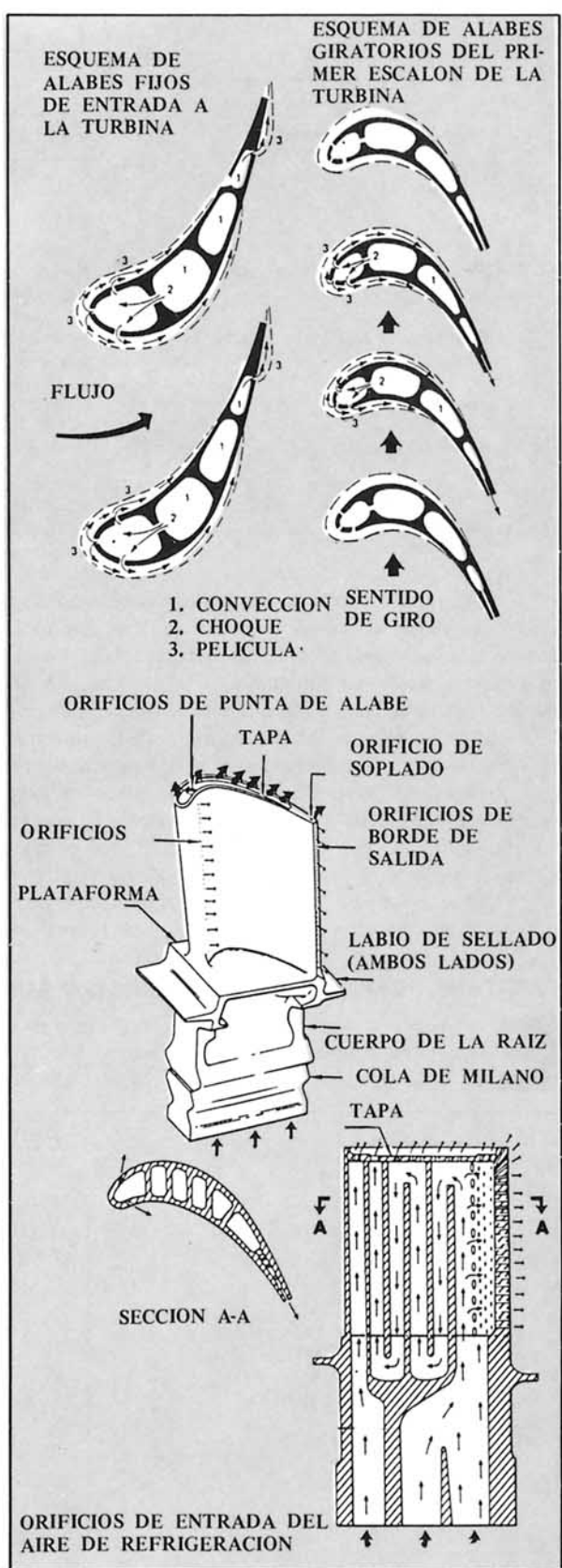


Figura 6. Detalles del sistema de refrigeración de álaves de turbina (General Electric)

Principales objetivos

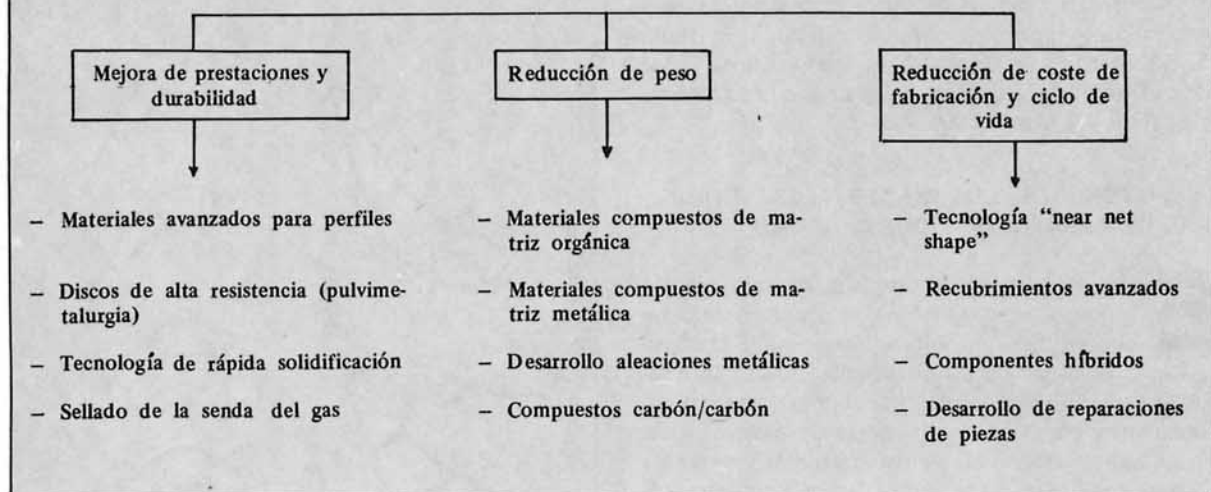


Figura 7. Tecnología de materiales y procesos

Esta rápida visión de los campos de desarrollo de nuevas tecnologías de materiales para motores como es obvio tiene que ser breve, pues se está trabajando en muy numerosas y diferentes áreas, lo que por otro lado indica que se pueden hacer todavía sensibles mejoras en los motores a reacción, esto unido a los esperados avances en diseño aerodinámico y estructural, harán que los motores que están aún en la mesa de proyectos tengan unas prestaciones sensiblemente mejoradas respecto a los de la última generación.

El desarrollo de los materiales para los motores civiles y militares es muy similar, aunque en los motores militares es donde históricamente se han aplicado primero los nuevos avances. Por otro lado suele ser habitual que los motores civiles se deriven de otros militares, por ejemplo, el motor General Electric CJ805 es la versión comercial del motor J79; el Rolls Royce RA29 deriva del militar Avon; el Pratt & Whitney JT3 es versión civil del J57, y el JT4 del J75, así como el JT8D está basado en el J52. Más modernamente, por ejemplo, el General Electric TF39 dio como versión civil el conocido CF6, por no citar más casos.

Como en otros campos de la tecnología, se comprueba que las inversiones inicialmente destinadas a potenciar la capacidad defensiva de un país tienen un inmediato aprovechamiento en el campo civil.

EL TITANIO: CAPACIDAD DE DESARROLLO AUN SIN EXPLOTAR

El titanio y sus aleaciones es un material aeronáutico por excelencia por su ligereza, resistencia equiparable en algunos casos al acero, excelente comportamiento a fatiga y resistencia a corrosión. En la actualidad se trabaja en el desarrollo de nuevas aleaciones de titanio de ultraalta resistencia, como

ALUMINUROS DE TITANIO

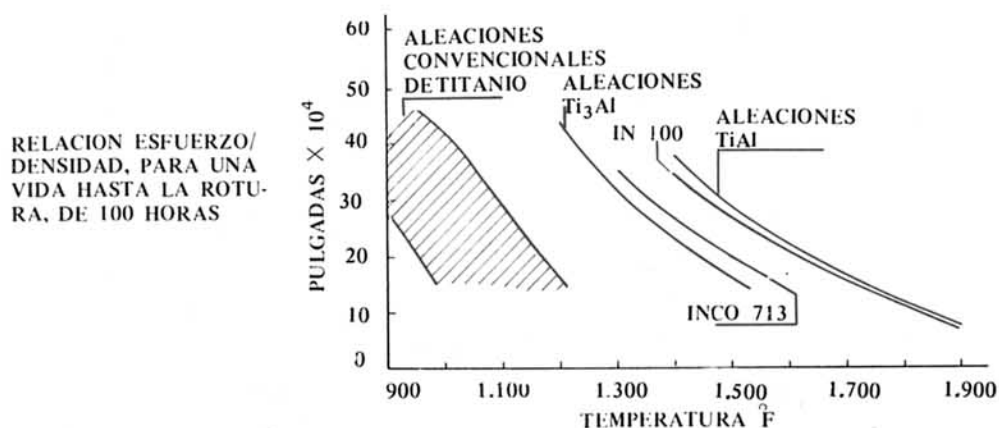


Figura 8

la Ti-10V-2Fe-3Al, con una carga de rotura que está en el rango de los 125 a 150 kg/mm², o la Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo, que alcanza del orden de 130 kg/mm². Por otro lado se intenta aumentar el margen de temperaturas de utilización, que en la actualidad llega hasta unos 550 °C con aleaciones como la citada Ti-6-2-4-6 o la inglesa IMI-829, mediante recubrimientos especiales, como deposición iónica de platino, o bien desarrollando aleaciones no convencionales conteniendo compuestos intermetálicos, como Ti₃Al(α₂) o TiAl(γ) a los que se añade Niobio (Nb), con capacidad de soportar la oxidación hasta los 900 °C; estas aleaciones, como se observa en la figura 8, serían comparables a superaleaciones de níquel como las Inco 713 o In 100.

LOS MATERIALES COMPUESTOS: FUTURO PROMETEDOR

Las tecnologías de fabricación de materiales compuestos han llegado a un nivel de madurez suficiente para ser introducidas en los nuevos diseños de motores, siendo las partes frías de los mismos, sección de entrada, carenas y cubiertas, las primeras que han visto piezas de material compuesto de matriz orgánica (ver figura 9), aunque con el progresivo desarrollo de matrices orgánicas resistentes a más alta temperatura y los compuestos de matriz metálica, su aplicación se hará extensiva a secciones más calientes del motor.

Los sistemas actuales en estudio para su aplicación a motores son fibra de vidrio/epoxy, grafito/epoxy, grafito/polimida y Kevlar/epoxy, como compuestos de matriz orgánica, y boro/aluminio, fibra FP (alúmina)/aluminio y Bor-Sic/titanio para los compuestos de matriz metálica.

Como ejemplos de aplicación de las nuevas tecnologías a motores de reacción podemos citar:

Estructuras y armazón del fan

Para el programa QCSEE de motor avanzado de la NASA se está desarrollando en grafito-epoxy, soporta un esfuerzo máximo de 690 MPa y está diseñado para absorber los desequilibrios creados por la pérdida simultánea de cinco álabes del fan. Su peso se reduce a 215 kg (20 por 100 de reducción respecto a un conjunto metálico).

Alabes guías de salida del fan

Para el motor JT9D de Pratt & Whitney, fabricados básicamente en grafito-epoxy, constan de un núcleo con fibras longitudinales (en dirección del álabes, radiales respecto al motor) para absorber las cargas de flexión y cuatro capas externas con fibras en orientación de ±30° respecto al eje con objeto de absorber las cargas de torsión. El álabes con un borde de ataque de aluminio para resistencia a impactos, está recubierto de una capa de poliuretano resistente a la erosión.

Se podrían citar numerosos ejemplos más, como el conducto externo de salida del motor F404 (F-18), fabricado actualmente en titanio, y a punto de cambiarse a un sistema grafito-polimida, o los flaps de la

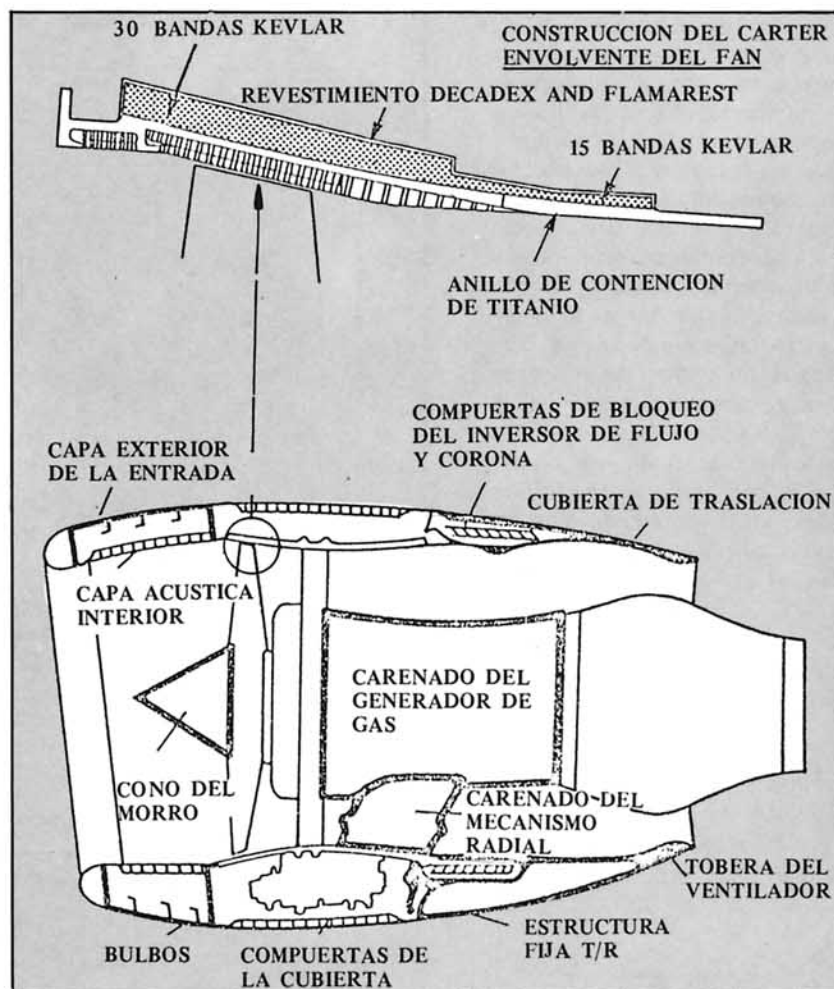


Figura 9. Esquema de componentes fabricados en materiales compuestos del motor RB211 - 525, -535 del Rolls-Royce

tobera de salida del motor PW1120 que se están diseñando directamente (sin sustituir a una pieza anterior metálica) en grafito-polimida.

NUEVOS MATERIALES PARA ALTA TEMPERATURA

Los álabes de la turbina de alta presión, debido a las rigurosas condiciones de temperatura, carga y atmósfera en las que operan, son normalmente los componentes del motor que limitan más la mejora de sus prestaciones. Las superaleaciones de níquel son una clase de materiales que poseen la combinación óptima de propiedades que se requieren para soportar estas condiciones de trabajo. Actualmente parece que se ha alcanzado un tope en la continua mejora de las características de estas aleaciones, que en los últimos 30 años se ha conseguido añadiendo distintos elementos de aleación para aumentar su resistencia y comportamiento a altas temperaturas. Se ha intentado reemplazar las superaleaciones base níquel por otros sistemas para elevada temperatura (por ejemplo, aleaciones base cromo o base niobio), pero sin ningún éxito, por lo que en los últimos años se ha intentado obtener componentes para altas temperaturas por tres vías diferentes:

- Desarrollar estructuras direccionales en superaleaciones base níquel.
- Materiales tipo carbón/carbón.
- Nuevos materiales cerámicos.

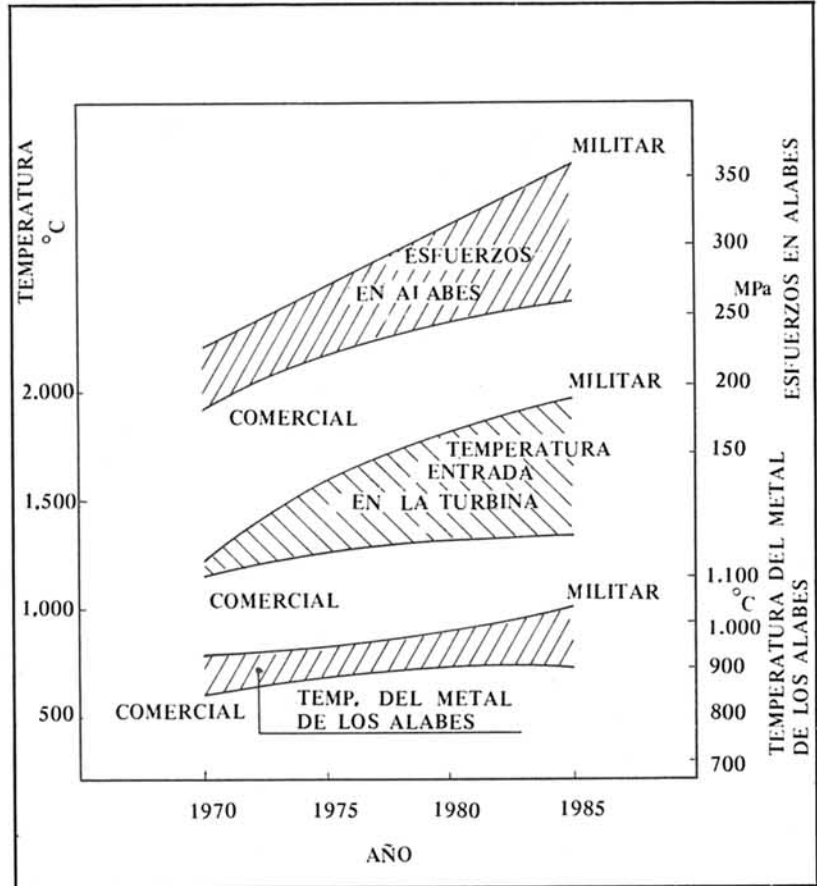


Figura 10. Condiciones de trabajo de los álabes de turbina

Estructuras	Ventaja	Desventaja
Granos direccionales.	Resistencia a fluencia y fatiga térmica buena.	Coste de producción elevado (se fabrican en la actualidad).
Monocristales.	Mejor resistencia a fluencia y fatiga térmica.	Anisotropía, coste (se fabrican en la actualidad).
Eutécticas de solidificación direccional.	Superior resistencia a fluencia que los monocristales.	Anisotropía, resistencia a corrosión baja, procesos complejos.
Recristalización direccional.	Resistencia a fluencia a mayores temperaturas.	Anisotropía, falta de ductilidad, problemas en la raíz de los álabes.
Superaleaciones reforzadas con fibras.	La de mejor resistencia a fluencia.	Anisotropía, peores características de fatiga térmica, difícil procesado, baja resistencia a corrosión, problemas en la raíz de los álabes.

Figura 11. Resumen de ventajas y desventajas de las estructuras direccionales

Estos nuevos materiales deberán permitir soportar las condiciones de trabajo que se pueden ver en la figura 10.

Estructuras direccionales en superaleaciones de níquel

Esta nueva forma de desarrollar las aleaciones base níquel consiste en someter el material a unos procesos tales que su microestructura se oriente de forma que la dirección más resistente del material coincida con el principal eje de esfuerzos del álabe. Hay distintos procedimientos para obtener estructuras direccionales.

1. Transformaciones durante la solidificación, mediante la cual se pueden producir:

- Alabes con granos columnares orientados con el eje principal de esfuerzos.
- Alabes monocristalinos, sin límites de grano.
- Eutécticas, que solidifican como una estructura con fases finamente alineadas, consistentes en una fase de refuerzo en una matriz de superaleación de níquel.

2. Transformaciones en estado sólido, llamadas recristalización direccional, en la que se obtienen granos cristalinos alineados mediante un proceso de recristalización y crecimiento de grano.

3. Técnicas de fabricación de materiales compuestos, en las que fibras de metales refractarios de alta resistencia se embeben en matrices de superaleaciones.

Las ventajas e inconvenientes de unas u otras soluciones pueden verse en la tabla de la figura 11.

A más largo plazo, se proyecta realizar componentes de turbina en materiales compuestos de carbono-carbono o reforzados con fibras cerámicas. La Aviación y la Marina estadounidense están realizando estudios y esperan no sólo mejorar las características, sino liberarse de la dependencia con respecto a los proveedores de cromo y cobalto, que son indispensables para la fabricación de las superaleaciones actuales.

CONCLUSION

Ha estado fuera de nuestra intención que esta breve exposición del pasado, presente y futuro de los materiales utilizados en los motores a reacción fuera una completa descripción de todos ellos, pues como se ha podido comprobar en estas líneas, la práctica totalidad de los materiales tienen su aplicación en los motores.

Queremos destacar, sin embargo, que estamos en uno de los campos de la ingeniería en el que la tecnología de materiales y procesos ha contribuido más significativamente a su desarrollo, y que para que los nuevos proyectos de motores alcancen los objetivos previstos, serán necesarias grandes inversiones en el desarrollo de los nuevos materiales, metálicos, compuestos y cerámicos. ■

Ejemplo de integración materiales metálicos-materiales compuestos

En la actualidad el "inlet particle separator swirl frame" del motor T700 de GE es una pieza completamente metálica que requiere operaciones de mecanizado, conformado a dimensiones, soldadura por fusión y soldadura fuerte. Profundos estudios demostraron que la fabricación de dicho conjunto mediante un híbrido de metal/material compuesto era posible con reducciones de peso y costo del orden del 30 por 100. La figura muestra un dibujo esquemático de una sección de la pieza que fue fabricada con acero inoxidable tipo AISI 410 y varios tipos de materiales compuestos con matriz de polimida. La carcasa externa utiliza acero inoxidable en el área mojada para cumplir los requisitos de baja temperatura y material compuesto tejido de vidrio/PMR-15 para satisfacer las exigencias estructurales. El composite vidrio/polimida fue elegido con criterios de bajo coste y razones estructurales. Un material formado por tejido de fibra de vidrio con matriz de polimida recubierto con aluminio es utilizado en el área mojada del diámetro interno para cumplir los requisitos de transferencia de calor para evitar formación de hielo. El material compuesto de tejido de vidrio/polimida en el borde delantero y las superficies internas frontales fue elegido por razones de coste y también por sus propiedades térmicas. Un modelo a escala natural (O.D. = 20 in) ha sido ensayado a erosión por arena y a impactos de bolas de hielo cumpliendo todos los requisitos. Se ha demostrado la posibilidad de fabricarlo y cumple todos los requerimientos de performances.

