

Aubes de turbines aéronautiques et automobiles – CES Edupack Aerospace

Cette étude utilise la version Aéronautique du logiciel CES EduPack (Aerospace Level 3) pour suggérer des matériaux alternatifs pour la fabrication d'aubes de turbine, pour des applications aéronautiques ou automobiles.

Pour ce faire, nous devons respecter les exigences sur les propriétés des matériaux à utiliser, tels que la température élevée et la résistance à la rupture brutale et au chargement centrifuge. Cette étude s'inspire d'un projet industriel de R&D présenté lors d'une conférence

Le ratio puissance / masse des moteurs est un paramètre particulièrement important pour des applications haute performance dans le domaine aéronautique ou automobile. Par exemple, dans le domaine automobile, la puissance d'un moteur à piston est directement dépendante de la quantité d'air injectée. La suralimentation Turbo vise à augmenter la pression de la tubulure d'admission et la densité du mélange gazeux afin d'augmenter la masse d'air injectée dans les cylindres pendant chaque cycle d'admission. Ceci est réalisé grâce à un turbocompresseur, compresseur d'air mono-étagé à flux radial (« centrifuge »), lui-même entraîné par une turbine à flux radial mono-étagé. La turbine reprend une partie de l'énergie cinétique et thermique du flux de gaz d'échappement haute température en sortie du moteur pour faire tourner le compresseur, ce qui génère une légère perte du rendement de combustion. Ce principe a été largement utilisé dans les moteurs automobiles à partir des années 1970.

Les moteurs d'avions à turbopropulseurs utilisent aussi des turbines à écoulement radial, tandis que les moteurs à réaction possèdent plusieurs types de turbine, fonctionnant à des températures différentes, suivant leur position (et fonction) dans le moteur : fan (à l'avant du moteur, basse température), turbine (en sortie de la chambre de combustion, haute température) et compresseur (à l'arrière de la turbine, température moyenne).

Toutes ces technologies offrent un fort ratio puissance / masse, mais leurs conditions de fonctionnement, très sévères, nécessitent des études poussées pour le choix de la forme et du matériau des aubes de turbine.



En quoi sont faites les aubes de turbine ?

Un turbocompresseur fonctionne dans un environnement particulièrement hostile. Les gaz d'échappement qui font tourner la turbine peuvent parfois dépasser 1000°C et sont très

corrosifs. Le disque de turbine est situé directement dans le flux des gaz d'échappement, qui sont éjectés à très haute vitesse. On note une expansion du gaz à travers la buse de turbine, ce qui réduit sa température, mais, à l'extrémité du rotor de la turbine, les températures restent très élevées. Les aubes de turbine des réacteurs travaillent dans des conditions similaires, voire même pires, à des températures d'environ 800°C. En outre, le système de rotor sur plusieurs turbocompresseurs tournent à des vitesses supérieures à 100 000 tr/min. La force centrifuge appliquée génère des efforts de traction énormes sur les aubes, en plus des efforts de flexion et des vibrations. On note également la possibilité de chocs thermiques et de fluage sur ces pièces.

Ainsi les turbines sont typiquement fabriquées en superalliages à base de nickel, ces matériaux conservant une haute résistance mécanique même à températures élevées. L'Inconel 713 C et 713 LC sont couramment utilisés pour la fabrication des aubes et les disques de turbines, fabriqués par moulage à la cire perdue, avec éventuellement un traitement isostatique à chaud (HIP) pour améliorer la microstructure, puis un traitement thermique ultérieur pour atteindre la résistance visée.

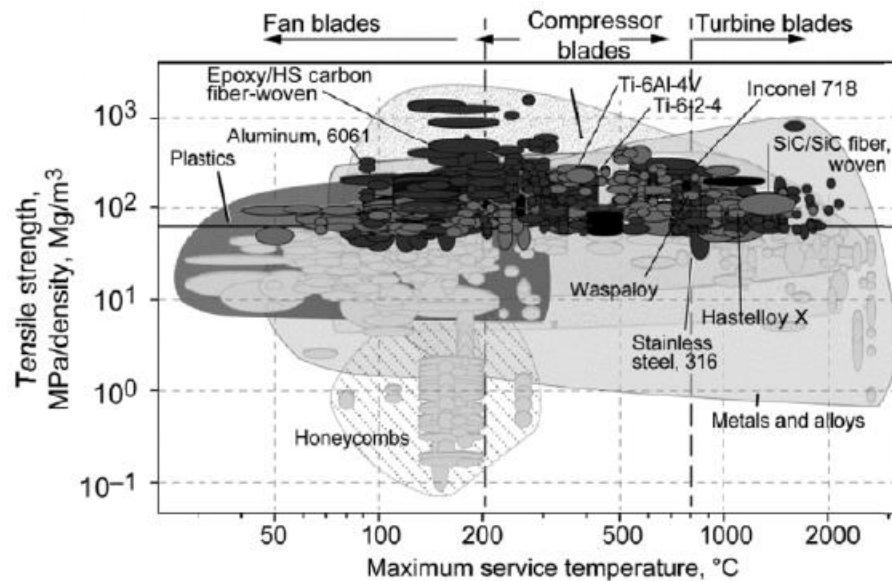
Quelles sont les conditions de fonctionnement des aubes ?

Une aube de turbine est soumise à une force centrifuge très importante, qui constituera l'un de nos facteurs critiques dans le choix du matériau. Les aubes doivent également résister à des efforts de flexion pendant les accélérations de la turbine (phase de démarrage) et aux vibrations générées par le moteur. Cela nécessite d'utiliser un matériau présentant une grande résistance mécanique. D'autre part, la rupture brutale des aubes est à considérer, du fait qu'elles peuvent alors devenir des projectiles, et endommager le moteur. On tiendra compte de ce paramètre au travers de la résistance du matériau à la propagation de fissure (soit sa ténacité). Notre but ici est donc d'identifier un matériau présentant une bonne combinaison de ces deux propriétés (résistance à la force centrifuge et à la propagation brutale de fissures), le tout avec une masse volumique faible (au vue de l'application visée).

De plus, compte tenu des conditions de chargement en service de ces aubes, la résistance à la fatigue est également une propriété à considérer, du fait que les pièces sont amenées à subir des chargements cycliques - le chargement cyclique ne renvoie pas ici à la rotation de la turbine, comme on pourrait le penser, mais plutôt aux efforts causés par les phases de marche / arrêt répétitives, les chocs thermiques conséquents, etc.

Enfin, le rayon de la turbine (longueur des pales l) est déterminé principalement par des considérations de flux et d'espace, il est donc considéré comme fixé à la conception.

Une étude approfondie des matériaux utilisés pour les aubes de turbine de réacteurs, utilisant les mêmes de base de données et méthodes de sélection, a été publiée par la NASA en 2012. Dans ce travail, les effets de la force centrifuge, des efforts de flexion et des vibrations appliqués aux aubes ont été considérés. Les différentes plages de températures considérées sont indiquées sur le graphique ci-dessous. Il ressort de cette étude que certains superalliages, ainsi que certaines céramiques techniques, qui présentent une bonne résistance mécanique à haute température, ainsi qu'une bonne résistance au fluage et à la corrosion (également à haute température), sont des matériaux envisageables pour remplacer l'Inconel 713 typiquement utilisé.



De notre côté, nous allons reprendre cette étude et rechercherons des candidats alternatifs au matériau Inconel 713 pour la fabrication d'aubes de turbine aéronautique. Nous souhaitons réaliser une étude la plus réaliste possible, mais face la complexité du design et des chargements appliqués aux aubes en service, nous nous concentrerons sur la résistance des matériaux à la force centrifuge, à la rupture brutale et à la fatigue, pour des applications haute température, mais nous ne considérerons pas explicitement les efforts de flexion et les vibrations. De même, nous ne prendrons pas en compte le refroidissement interne, les revêtements / barrière thermique ou les formes monocristallines des aubes.

Dans un premier temps, vous vous renseignerez sur les propriétés des alliages de nickel-chrome et de l'Inconel 713 en particulier, matériau qui nous servira de référence tout au long de cette étude, ainsi que sur la technique du moulage à la cire perdue. Ensuite, vous établirez un cahier des charges pour les aubes de turbine aéronautiques, avant de mettre en place la démarche de sélection sur le logiciel CES Edupack version Aerospace, afin d'identifier des candidats potentiels pour remplacer l'Inconel pour la fabrication de ces pièces.