Développement, propriétés et applications de matériaux de haute température pour moteurs aéronautiques

Tasadduq Khan

Summary **Development, properties and applications of high temperature materials for aeronautical engines**
The design of advanced aircraft engines of the future needs materials allowing more power and reliability at lower costs. The research is oriented towards matured materials and novel emerging materials. The lifting of such materials will require a multiscale computational approach.
Mots-clés **Superalliages, intermétalliques, céramiques, barrières thermiques, modélisation, turbines.**
Key-words **Superalloys, intermetallics, ceramics, thermal barrier coatings, modelling, turbines.**

Les matériaux structuraux pour application à haute température ont fortement contribué à l'accroissement des performances des moteurs pour l'aéronautique civile et militaire. Les exigences pour la conception des moteurs du futur portent sur plus de puissance, l'allègement, l'économie de carburant et des coûts opérationnels réduits. L'importance croissante du facteur « coût » réduit l'utilisation de nouveaux matériaux, et l'approche multidisciplinaire intégrant le développement du matériau et la modélisation sont de plus en plus à associer étroitement. Cette situation nouvelle oblige les chercheurs à adopter une approche conduisant à une « maturation » accélérée du matériau combinant des efforts d'expérimentation et de calcul. Dans cet article, les matériaux apparaissent en deux catégories :

- Les matériaux conventionnels/évolutifs (matériaux mûrs),
- Les matériaux révolutionnaires, à « saut quantique » (matériaux émergents)…

Les matériaux de la première catégorie doivent répondre, par leur conception, à des propriétés cibles spécifiques dans un délai relativement court. Ces objectifs restent modestes comme, par exemple, 20-30 °C en température d'utilisation ou 10 à 15 % en résistance. De petites modifications dans le procédé d'élaboration, dans la composition ou dans le traitement thermique permettent en général d'atteindre cet objectif. Typiquement, les superalliages monocristallins à base de Ni pour aubes de turbines ou les disques de turbomachines par métallurgie des poudres appartiennent à cette catégorie.

L'autre catégorie implique une percée technologique. Par exemple, l'emploi de barrières thermiques avancées sur les monocristaux de superalliages peut autoriser une augmentation de 100-150 °C par rapport à celle que supporte un superalliage monocristallin muni d'un revêtement conventionnel. De même, l'utilisation d'un anneau intermétallique léger renforcé par des fibres en carbure de silicium dans un compresseur, peut procurer un allègement de 50 à 70 % de la partie compresseur d'un turbomoteur.

Cet article se propose de présenter des matériaux choisis (mûrs ou émergents) en tenant compte des aspects de mise en œuvre et de fiabilité et suggère les stratégies qui pourraient accélérer leur mise en exploitation.

Superalliages monocristallins et barrières thermiques

Les 30 dernières années ont vu, grâce à l'effort de recherche, un accroissement considérable de la température acceptée par les superalliages en passant de la fonderie traditionnelle à la solidification dirigée, puis aux monocristaux, soit un gain d'environ 100 °C. Les alliages de la 3e génération récemment développés en France et aux États-Unis ont des résistances à la rupture comme indiqué sur le diagramme de Larson-Miller de la *figure 1*.

La question qui se pose concerne la capacité d'amélioration de la tenue vers les plus hautes températures des

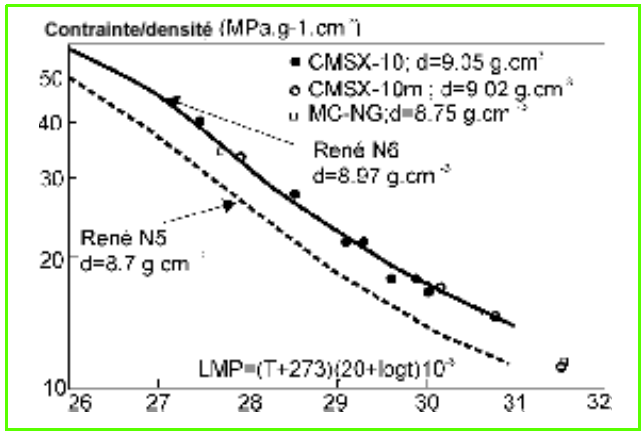

Figure 1 - Comparaison des courbes de contrainte rupture de Larson-Miller pour les superalliages monocristallins de 2e et 3e génération.

superalliages monocristallins. La réponse est claire : ils sont très proches de l'asymptote en température et il ne reste pas de possibilité de progrès significatifs qui seraient rentables. L'effort doit donc désormais porter sur les barrières thermiques et sur une approche prédictive de la durée de vie, plutôt que sur la recherche de nouvelles nuances. On peut ainsi obtenir un gain de 100 °C en température d'emploi. Le revêtement servant de barrière thermique (thermal barrier coating : TBC) est en fait un véritable système constitué :

- de la TBC elle-même,
- du substrat en superalliage,
- d'une couche de liaison contenant de l'aluminium entre le substrat et la TBC (bond coat : BC),
- d'une couche d'oxyde formée thermiquement entre TBC et BC (thermally grown oxyde : TGO).

La TBC est l'isolant, la BC procure la protection contre l'oxydation, mais c'est l'alliage qui supporte la charge structurale. Le TGO est un produit de réaction. Chaque élément a un rôle dynamique et ils interagissent pour contrôler performance et durabilité. Les TBC sont déjà utilisés sur des turbomachines, mais avec une approche prudente et un peu conservatrice dans leur mise en œuvre qui n'a pas encore permis d'utiliser tout leur potentiel, notamment en terme d'augmentation de la température à l'entrée de la turbine.

Il est donc essentiel d'entreprendre l'analyse du cycle de vie d'un système très complexe dans le cadre de la mécanique de l'endommagement, en considérant la viscoplasticité, l'endommagement et l'oxydation (modèle totalement couplé). La prévision de la durée de vie développée jusqu'ici pour les composants à barrière thermique, qu'ils soient réalisés par projection plasma ou par EBVD, est surtout basée sur des approches phénoménologiques comprenant l'endommagement lié à la fatigue par cyclage mécanique et thermique, couplé à la déformation due à l'oxydation de la couche de liaison. Pour un système donné et pour des conditions expérimentales assez proches de celles qui ont servi pour déterminer les paramètres ajustables entrant dans les modèles, ce type d'approche peut donner un ordre de grandeur très correct de la durée de vie attendue.

Il faut cependant noter que les bases physiques des hypothèses du modèle sont l'objet de discussions, en particulier la notion d'épaisseur critique de la couche d'aluminium au-dessus de laquelle l'écaillage de la couche de céramique peut devenir systématique. Une approche pour déterminer les champs de contraintes, les propriétés mécaniques locales (« ténacité » interfaciale, loi constitutive de revêtements minces), et tenant compte de l'évolution du système en fonction du temps et de la température, devrait procurer une meilleure compréhension et des modèles valables de prévision de la durée de vie pour permettre aux concepteurs de machines d'exploiter tout le potentiel des barrières thermiques.

Les intermétalliques

Les composés intermétalliques à base de titane peuvent être retenus comme les plus proches de la maturité parmi les matériaux dits « émergents ». Deux parmi ceux qui ont été étudiés jusqu'ici méritent d'être mentionnés pour la recherche intense dont ils ont bénéficié : TiAl et Ti_2AlNb de type orthorhombique.

Les matériaux contenant TiAl ou la phase orthorhombique sont utilisables dans le domaine 650-750 °C. Les aluminures γTiAl, dont la densité est la moitié des bases Ni, sont des candidats très intéressants pour réduire de façon significative le poids dans la partie basse pression de la turbine, les carters… De nouveaux intermétalliques avancés à base de TiAl ont été développés et l'un d'eux a été essayé avec succès sur moteur par GE Aircraft Engines aux États-Unis.

A plus long terme, les intermétalliques à base orthorhombique sont prometteurs pour réaliser des carters et comme matrice de composites (MMC).

Composites à matrice métallique (CMM)

Les composites à matrice titane et à matrice intermétallique comptent dans la catégorie des matériaux « révolutionnaires » avec de fortes retombées. Ils sont renforcés avec des fibres de SiC. Le *tableau I* donne quelques caractéristiques d'un Ti 6.2.4.2 renforcé fibres de SiC (40 % de fraction volumique).

Tableau I - Propriétés d'un CMM Ti renforcé SiC.

Charge à la rupture	1 900 Mpa
Module d'Young	230 GPa
Allongement à la rupture	environ 1 %

Les CMM base titane ont atteint l'étape où leur emploi dans des pièces statiques est acquis. Ils approchent de la maturité pour les compresseurs haute température. Ils ont la capacité de permettre de remplacer les disques à aubes (blisks) par des anneaux à aubes (blings), mais leur prix actuel n'a pas permis leur introduction. La recherche porte sur les techniques de fabrication procurant un produit convenable avec une répartition uniforme des fibres. Pour des applications critiques, un procédé exige, pour être acceptable, que les fibres soient enrobées individuellement par l'alliage, puis consolidées. Cette approche exclut les techniques feuillage-fibre-feuillage ou par pulvérisation plasma. La recherche en France se poursuit à la Snecma sur une technique très efficace d'enrobage des fibres avec enduction à travers un bain liquide. Il est indispensable que parallèlement au développement du procédé, une méthode de calcul fiable soit conduite. L'ONERA a récemment développé une approche originale consistant à effectuer un véritable calcul multi-échelles où les échelles mésoscopiques et macroscopiques sont calculées de façon simultanée, ce qui nécessite du calcul parallèle. A l'échelle mésoscopique, le comportement élasto-visco-plastique de la matrice est pris en considération. Les phénomènes complexes irréversibles sont décrits en détail à l'échelle de la fibre avec son interface (échelle mésoscopique), et les propriétés non linéaires à l'échelle macroscopique sont engendrées directement. Cette nouvelle approche numérique multi-échelles est fondée sur une analyse par éléments finis imbriqués, appelée (EF2). Elle est utilisée dans les situations où l'échelle mésoscopique peut être discrétisée par un réseau quasi périodique. A l'échelle macroscopique, chaque élément de volume représentatif (les points d'intégration) contient une « microstructure » qui est traitée par éléments finis (échelle méso). Ainsi, la loi constitutive à l'échelle macroscopique est directement dérivée *(in situ* et en temps réel) en conséquence de ce qui se passe à l'échelle inférieure. Par exemple, dans une structure constituée d'un composite unidirectionnel, les

mécanismes mésoscopiques (fibre, matrice, interface) sont calculables avec grande précision en considérant tous les phénomènes pertinents que sont, entre autres, l'élasticité anisotrope de la fibre et le comportement thermo-élasto-plastique de la matrice.

Composites à matrice céramique (CMC)

Les composites à matrice céramique (CMC) apportent la seule possibilité de franchir la barrière de température représentée par la température de fusion de la plupart des métaux. Les barrières thermiques en céramique déposée sur les superalliages base Ni ont déjà été présentées comme solution pour étendre la tenue en température des aubes de turbine. Le renforcement par fibre de nombreuses céramiques est un moyen vérifié pour limiter leur fragilité et leur faible tolérance à l'endommagement. Ce renforcement tient surtout à l'énergie dissipée lors de la fracture par décohésion de l'interface fibre-céramique. L'enrobage des fibres et la maîtrise de l'interface permettent de contrôler les caractéristiques de la fracture.

Par exemple, une interface BN/SiC procure un matériau de grande tolérance au dommage. La recherche d'interfaces nouvelles améliorant cette tolérance au dommage et la résistance à l'oxydation sur de longues durées est un objectif pour le long terme. La réalisation de tout leur potentiel à très haute température dépendra de la réponse au problème de la capacité à conserver dans la durée leur ténacité. Un effort très important est accompli en France par Snecma Moteurs pour réduire les coûts de ces matériaux grâce à des procédés innovants.

Pour les températures extrêmes (fonctionnement au-dessus de 1 100 °C), de nouvelles fibres céramiques sont indispensables. A l'échelle du laboratoire, des fibres possédant des propriétés très intéressantes à haute température ont été obtenues. Le problème pratique réside dans le coût de leur mise en œuvre à plus grande échelle. En particulier, l'investissement nécessaire pour produire les quantités indispensables à la réalisation de produits est si élevé qu'il en devient prohibitif. C'est un cas typique où le rapport coût/volume des nouveaux matériaux est important et où l'émergence de multiples applications desserrerait cette contrainte. Mais la pression actuelle sur les coûts constitue en elle-même une limite à l'élargissement des applications, ce qui restreint le marché potentiel. Cependant, la perspective à long terme de composites à matrice céramique semble techniquement attractive si le problème économique est surmonté.

Conclusions

Au cours des dernières années, la communauté des matériaux a surtout concentré ses efforts sur les nouveaux matériaux, ce qui a conduit au développement d'une grande variété de matériaux résistant à de hautes températures. Mais le contexte industriel a été radicalement modifié en insistant sur des réductions de coûts sans perte de performances. La performance n'est plus acceptable comme seul critère. Comme les matériaux sont de plus en plus complexes et adaptés aux besoins spécifiques des composants, leur introduction, pour être un succès, devra combiner les efforts des producteurs et transformateurs, des concepteurs, des spécialistes en science et ingénierie des matériaux et des producteurs de composants. Cette situation nouvelle nécessite manifestement un effort concerté où chaque partenaire apporte sa compétence particulière pour contribuer au développement du produit fini.

L'arrivée des ordinateurs massivement parallèles rend progressivement possible l'adoption d'une stratégie d'approche numérique réellement multi-échelles pour application à des structures hétérogènes comme les composites à matrice titane (ou intermétallique) renforcés par des fibres de carbure de silicium.

Les modèles, basés sur une approche multi-échelles par éléments finis, rendent possibles des calculs réalistes conduisant à une description géométrique détaillée et à des équations constitutives donnant accès à des données « microstructurales » plutôt qu'à des données phénoménologiques macroscopiques. Il est donc maintenant possible d'effectuer l'analyse nécessaire à la mise en œuvre de structures aussi complexes que celles des disques de compresseurs renforcés par fibres. On espère que ce type d'approche conférera une plus grande fiabilité d'utilisation aux matériaux émergents dans les systèmes du futur.

Tasadduq Khan
est Directeur scientifique de la branche Matériaux et structures de l'ONERA*.

* Onera, 29 avenue de la Division Leclerc, BP 72, 92322 Châtillon Cedex.
Tél. : 01 46 73 44 77. Fax : 01 46 73 41 77.
E-mail : khan@onera.fr