

Journée Scientifique FERMI : « Les métaux en conditions extrêmes » Résumé des communications

1 **Fatigue sous conditions représentatives dans le contexte aéronautique** par Vincent Bonnand et Didier Pacou (vincent.bonnand@onera.fr)

Le dimensionnement en fatigue de pièces aéronautiques s'oriente de plus en plus vers un accroissement de la représentativité des essais menés en laboratoire sur éprouvette. Selon les situations, l'Onera a développé des bancs de fatigue qui sont adaptés aux sollicitations vues par des pièces en fonctionnement. Dans le contexte aéronautique, deux grandes tendances sont observées, le régime anisotherme et la multiaxialité. Pour les aubes de turbine monocristallines, le chargement anisotherme est un grand enjeu pour deux raisons principales, soit simplement par validation de la chaîne complète de dimensionnement en s'appuyant sur des éprouvettes simples ou technologiques, soit par ce qu'il est responsable d'une évolution microstructurale susceptible d'affecter significativement la résistance de la pièce en service. Le second aspect concerne la multiaxialité des chargements. Deux cas industriels seront abordés, à savoir les disques de turbine et les engrenages de rotor. Les disques subissent des chargements essentiellement équibiaxiés induit par la force centrifuge et dont l'estimation de durée de vie est essentielle dans les démarches de certification. Concernant la problématique des engrenages, les efforts de contact induisent potentiellement des sites d'amorçage dont la propagation s'effectuera pour une large part en mode II qu'il convient de caractériser. Malgré l'absence a priori de lien sur le plan industriel, ces 2 dernières problématiques seront traitées sur une installation de fatigue biaxiale coplanaire permettant d'aborder des sollicitations réalistes des pièces en service.

2 **La révolution des alliages réfractaires à haute teneur en aluminium** par Mathieu Couvrat (mathieu.couvrat@manoir.eu.com)

Les alliages réfractaires à base Fe, Cr, Ni sont couramment utilisés pour des applications à des températures supérieures à 1000°C au sein de fours pour l'industrie pétrochimique, pour la réduction directe du minerai de fer ainsi que pour quelques autres applications tel que les fours de sidérurgie. Ces matériaux représentent un marché de 13000 à 15000 tonnes par an pour approximativement 500 million d'euros.

Dans leurs applications en fours de pétrochimie, ils sont soumis à des environnements extrêmes impliquant de très hautes températures et des phénomènes de cokage, carburation, oxydation et nitruration, sur de longues durées et comportant des cycles. C'est ainsi que le matériau du four est aujourd'hui le paramètre limitant du rendement de production.

Des progrès sur les performances de ces alliages réfractaire ont été fait continuellement depuis les années 1970. Aujourd'hui nous assistons néanmoins à un changement majeur avec le développement de nouveaux alliages à forte teneur en aluminium se protégeant mieux contre tous les types de dégradation et améliorant de manière significative les performances en four.

3 Chargement de balistique terminale associé à l'interaction entre perforant et protection métallique

par Hervé Couque (H.COUCQUE@nexter-group.fr)

L'interaction d'un projectile et d'une protection implique des chargements mécaniques non atteignables en laboratoire. Pour s'en approcher on utilise des moyens de chargement dynamique de type barres d'Hopkinson et d'impact de Taylor. Ses moyens sont présentés avec un objectif de décrire la formation de bandes de cisaillement adiabatique, phénomènes de ruine reconnues comme l'un des mécanismes fondamentaux à la fois lors de la consommation de projectile métallique, et lors de la dégradation de protection métallique.

4 Les matériaux métalliques fortement irradiés dans l'industrie nucléaire

par Jérôme Garnier, Yann de Carlan, Joel Ribis, Joel Malaplate, Fabien Onimus (jerome.garnier@cea.fr)

Avec leur liaison atomique très particulière, les matériaux métalliques présentent une tolérance à l'irradiation qui est exceptionnelle. L'irradiation neutronique provoque une éjection des atomes de leur site d'origine dans le réseau mais grâce aux phénomènes de recombinaison et de diffusion ainsi qu'à la flexibilité de la liaison métallique, le matériau peut retrouver facilement un état proche de l'état initial.

L'industrie nucléaire a rapidement compris l'avantage que l'on pouvait tirer de cette spécificité et les matériaux métalliques sont largement utilisés comme matériaux de structure ou comme matériaux de confinement. Que ce soit les alliages de zirconium, les aciers ou les alliages d'aluminium ils peuvent subir des irradiations conséquentes avant que leurs propriétés ne soient trop dégradées pour qu'ils puissent continuer d'être utilisés.

Cette présentation se propose de rappeler les mécanismes élémentaires qui conduisent à la dégradation des alliages sous irradiation et de montrer à travers des exemples industriels que la limite en dose admissible dépend principalement des attentes sur les performances mécaniques mais aussi des tolérances géométriques acceptables pour le composant. En effet, l'irradiation peut conduire aussi à une modification de la géométrie du composant (croissance ou gonflement) qui ont été une grande surprise ou début de l'utilisation des alliages sous irradiation.

5 Voyage au cœur des processus de corrosion des métaux en milieu acide nitrique

par Benoît Gwinner (benoit.gwinner@cea.fr), A. Fallet, P. Fauvet, N. Gruet, P. Laghoutaris, F. Miserque, B. Puga

Den-Service de la Corrosion et du Comportement des Matériaux dans leur Environnement (SCCME), CEA, Université Paris-Saclay, F-91191, Gif-sur-Yvette, France

La durabilité des usines de traitement-recyclage du combustible nucléaire usé est un enjeu industriel majeur. Un point clé concerne l'évaluation du vieillissement des installations industrielles (principalement fabriquées en aciers austénitiques inoxydables) dû à la corrosion par le milieu oxydant de dissolution du combustible (acide nitrique contenant de nombreuses espèces issues du combustible dissous). Cet objectif est atteint en contrôlant rigoureusement et régulièrement l'évolution de l'épaisseur des parois des équipements et en étudiant les mécanismes de corrosion associés.

Le principal mode de corrosion impliqué est la corrosion uniforme, où le métal se dissout lentement avec une vitesse similaire sur toute la surface. Cette faible vitesse de dissolution est associée à la présence d'un film d'oxyde protecteur qui se forme spontanément à la surface. Les caractéristiques de ce film ont été étudiées en détails à l'aide de différentes techniques (électrochimie, spectrométrie de photoélectrons induits par rayon X, microscopie électronique en transmission, ...) de manière à clarifier ses propriétés (composition chimique, épaisseur, cinétique de formation, ...) [1-3].

Dans des cas particuliers, une dissolution préférentielle des joints de grain peut apparaître, menant à un mode de corrosion intergranulaire. Il a été montré qu'un tel mode de corrosion localisée peut être géré comme une corrosion uniforme. Ceci a été rendu possible grâce au développement d'une modélisation de ce mode de corrosion [4].

1. Tcharkhtchi-Gillard, E., et al., Kinetics of the oxidation of stainless steel in hot and concentrated nitric acid in the passive and transpassive domains. *Corrosion Science*, 2016. 107: p. 182-192.
2. Benoit, M., et al., Comparison of different methods for measuring the passive film thickness on metals. *Electrochimica Acta*, 2016. 201: p. 340-347.
3. Laurent, B., et al., Dissolution and Passivation of a Silicon-Rich Austenitic Stainless Steel during Active-Passive Cycles in Sulfuric and Nitric Acid. *Journal of The Electrochemical Society*, 2017. 164(13): p.C892-C900.
4. Gwinner, B., et al., Towards a reliable determination of the intergranular corrosion rate of austenitic stainless steel in oxidizing media. *Corrosion Science*, 2016. 107: p. 60-75.

6 Relation entre le comportement macroscopique et la microstructure pour des alliages base nickel sous sollicitation dynamique

par Gerald Portemont (gerald.portemont@onera.fr)

Les alliages base nickel sont fortement utilisés dans l'industrie aéronautique pour la fabrication d'éléments structuraux des turbomachines. Le dimensionnement de ces pièces nécessite d'étudier le comportement de ces alliages sur une large gamme de vitesses de déformation pour des températures élevées de l'ordre de 1000°C. Pour cela, ces matériaux sont sollicités pour différents chargements monotones à l'aide de vérins hydrauliques et barres Hopkinson. Ces essais permettent d'estimer les évolutions du seuil de plasticité et l'écrouissage des matériaux pour une gamme de vitesse comprises entre 0.001 s⁻¹ et 1000s⁻¹ et des températures entre 20°C et 800°C. Les faciès de rupture des échantillons sont ensuite analysés par microscope électronique à balayage pour comprendre les effets de la vitesse et de la température sur les orientations locales de la microstructure. L'interprétation de ces résultats reste à ce jour très délicat notamment sur l'effet de la vitesse. Ces essais de caractérisation permettent d'identifier les paramètres de modèles visco-plastiques. Ces modèles phénoménologiques sont ensuite implémentés dans des codes de calcul éléments finis pour prédire les conséquences de la perte d'une pale de rotor sur les nouvelles architectures moteurs.

7 La combustion des métaux sous atmosphère d'oxygène pur. Etude de l'allumage des métaux par un dépôt précis d'énergie laser

par Frédéric Coste* et Martina Ridlova**

*PIMM, UMR CNRS-ENSAM-LeCnam 152 Boulevard de l'Hopital, 75013 PARIS. (frederic.coste@ensam.eu)

**Air Liquide R&D, Paris Innovation Campus, 1 Chemin de la Porte des Loges, BP126 Les Loges-en-Josas, 78350 Jouy-en-Josas Cedex FRANCE

La problématique de la combustion des métaux sous atmosphère d'oxygène pur est étudiée depuis plusieurs décennies en vue de renforcer la sécurité des installations de production, de transport et d'utilisation d'oxygène sous pression. Opération d'installations industrielles dans des conditions plus sévères (pression, débit, températures d'oxygène) a conduit à rechercher des moyens d'investigation de l'allumage et de la propagation d'une combustion permettant une analyse plus fine que l'allumage conventionnel pyrotechnique du test normalisé ASTM G-124. L'utilisation d'un dépôt d'énergie laser permet de maîtriser les conditions d'allumage et l'instrumentation par caméra rapide étalonnée en pyrométrie rend possible une compréhension approfondie de la genèse de l'allumage.

8 Parties chaudes des équipements aéronautiques : Les défis matériaux et procédés par Clara Desgranges (clara.desgranges@safrangroup.com)

Les conditions de fonctionnement des moteurs aéronautiques mènent à des conditions extrêmes de sollicitation des pièces de par leur vitesse de rotation et leur température. Pour les aubes en superalliages base Ni de la turbine Haute pression, par exemple, les exigences liées aux seules sollicitations mécaniques sont multiples : il faut gérer les compromis entre la tenue en fatigue, au fluage et les problèmes d'usure de contact (le « fretting ») au niveau du pied d'aube. L'ajout de revêtements type barrière thermique (BT) à la surface des pièces permet d'accroître leurs performances en fluage. Cette solution requiert de développer les procédés de revêtement adéquats mais nécessite également de refroidir les aubes par le biais de canaux internes et exige donc d'adapter également les procédés d'élaboration des aubes à ce type de design. La durée de vie du système aube-BT en fonctionnement est limitée par les phénomènes d'oxydation et de corrosion qui sont également prégnants dans les parties chaudes des turbines et concernent les disques comme les aubes. En effet, le flux vu par les pièces est chargé de produits qui sont en général une résultante de la réaction de combustion du carburant, mais qui intègrent aussi de l'eau, des sables, et sels contenus dans l'air entrant ingéré par la turbomachine. Le carburant contient également des impuretés et des produits sulfurés (malgré les limitations réglementaires sur les teneurs). Les mécanismes de dégradations sont différents suivants les plages de températures et la position des pièces. Ainsi certaines pièces sont dégradées par les dépôts de type CMAS ($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$), d'autres par les sulfates alcalins, et d'autres encore par les phénomènes d'oxydation cyclique.

Les enjeux environnementaux actuels exigent une diminution de la consommation spécifique des turbomachines, qui passe principalement par des solutions d'allègement mais également une augmentation des vitesses de rotation et des températures de fonctionnement des pièces pour accroître les rendements. Nous donnerons des exemples de recherches scientifiques actuelles en lien ces nouveaux défis pour les matériaux et les procédés des équipements aéronautiques.

9 Alliages et procédés mis en œuvre pour la fabrication de culasses automobiles utilisées dans les moteurs à combustion interne par Denis Massinon (Denis.Massinon@Montupet-Group.com)

L'évolution des contraintes environnementales, par exemple la norme EURO 6.2 entrée en vigueur en Septembre 2018, amène les constructeurs automobiles à développer des moteurs à la fois moins polluants et moins gourmands en carburants. L'exigence de performances équivalentes étant maintenue, ces contraintes ont conduit les motoristes à innover sur les systèmes de combustion

(injection directe sur les moteurs diesel ainsi que sur les moteurs essence), à généraliser l'utilisation du turbo, et bien sûr à mettre en œuvre des filtres pour piéger les particules.

Ces évolutions ont eu pour conséquence l'augmentation des contraintes thermomécaniques exercées sur un certain nombre de composants du haut moteur, dont la culasse. Celle-ci étant le point de passage obligé de l'ensemble des fluides (carburant, air, gaz d'échappement) nécessaires au fonctionnement du moteur, ainsi que du liquide de refroidissement et de l'huile requise pour la lubrification de l'attelage mobile (arbres à cames) a vu sa complexité géométrique augmenter significativement avec notamment le nombre de cavités internes requises pour la circulation de ces différents fluides (jusqu'à 12 sur certaines culasses en développement)

Parallèlement, les niveaux de pression et de température atteints dans la culasse requièrent des caractéristiques mécaniques toujours plus élevées. Le défi imposé au métallurgiste ici consiste à :

- mettre en œuvre des alliages avec une excellente aptitude au moulage, indispensable pour produire de manière robuste des culasses dont la complexité géométrique augmente sans arrêt
- garantir des caractéristiques mécaniques élevées donc à température ambiante,
- comprendre et maîtriser le vieillissement du matériau, dans la mesure où les températures atteintes en service dépassent les 250°C.

L'auteur présentera les caractéristiques fonctionnelles des culasses de certains de ces moteurs, ainsi que certaines des solutions développées en matière d'alliages et de traitement thermique pour répondre à ce triple défi.