

nov. -déc. 2012



NEWSLETTER 50



CENTRE DES MATERIAUX
P.M.FOURT

La Newsletter du CdM - Mines ParisTech



Editorial



1	Editorial
1	Faits marquants
2	Le point Presse
3	Séminaires
3	Repas de fin d'année
4	Visite de scolaires
5-11	Soutenances de thèses
11	Symposium pour G. LESOULT

16! Pas moins! 16 thèses soutenues pour ces dernières semaines de 2012. Vous en trouverez les résumés des pages 5 à 11.

Cela n'a pas empêché de tenir des séminaires et de participer à d'autres événements scientifiques.

Parmi ces derniers, un symposium, tenu à Nancy, en l'honneur de Gérard Lesoult, un responsable d'équipe de Recherche du CdM de la première heure, et auquel ont participé Y.

Bienvenu, A. Pineau et d'anciens doctorants (J-J Favier, J. Lacaze, J-M Theret).

Ceci me fait dire à ces jeunes qui s'éloignent : "gardez un oeil sur le Centre, vous y reviendrez, flattés d'appartenir à cette communauté".

Année après année, les pages de notre histoire s'écrivent, et chacun d'entre nous y contribue. Ne l'oublions pas.

Bonne lecture
Françoise DI RIENZO

Faits marquants de novembre-décembre

- **09/11/2012** : soutenance de thèse de Mamane OUMAROU
- **16/11/2012** : soutenance de thèse de Prajwal SABNIS
- **16/11/2012** : séminaire "Fissuration à haute température de superalliages utilisés dans les moteurs aéronautiques"
- **19/11/2012** : séminaire "Durée de vie des structures à chargements complexes"
- **19/11/2012** : soutenance de thèse de Mi HE
- **22/11/2012** : séminaire "Strategies for next generation advanced high strength sheet steel - Development for automotive applications", Professeur Emmanuel DE MOOR - Colorado

School of Mines (Advanced Steel Processing and Products Research Center)

- **23/11/2012** : séminaire "Superalliages à base nickel : microstructures et propriétés mécaniques"
- **26/11/2012** : soutenance de thèse d'Anthony MARAIS
- **27/11/2012** : soutenance de thèse de Mathieu TOUBOUL
- **28/11/2012** : soutenance de thèse d'Antonin STECKMEYER
- **29/11/2012** : soutenance de thèse de Pierre SALLOT
- **03/12/2012** : soutenance de thèse d'Arthur HELLOUIN DE MENIBUS

• **06/12/2012** : soutenance de thèse de Charlotte KALCK

- **10/12/2012** : soutenance de thèse de Justin DIRENBERGER
- **10/12/2012** : soutenance de thèse de Guillaume MARTIN
- **14/12/2012** : soutenance de thèse de Julian DURAND
- **14/12/2012** : soutenance de thèse de Xu HAN
- **18/12/2012** : soutenance de thèse de Yang SHEN
- **20/12/2012** : soutenance de thèse de Laurent MAZE
- **21/12/2012** : soutenance de thèse de Pauline HUGUENIN

Revue, congrès ... le point de novembre - décembre

Revue à comités de lecture

LAIARINANDRASANA Lucien, NZIAKOU Y., HALARY J.L., Fracture behavior of amorphous and semicrystalline blends of poly(vinylidene fluoride) and poly(methyl methacrylate), *Journal of polymer science, part B polymer physics*, 2012, 50, p. 1740-1747

PRE P., HUCHET G., JEULIN D., ROUZAUD J.N., SENNOUR Mohamed, THOREL Alain, A new approach to characterize the nanostructure of activated carbons from mathematical morphology applied to high resolution transmission electron microscopy images, *Carbon*, 2013, 52, p. 239-258

TASVANOGU T., JEANDIN Michel, ADDEMIR O., YUCEL O., A functionally graded multilayer approach to the synthesis of boron containing ceramic thin films, *Solid state sciences*, 2012, 14, p. 1717-1721

Chapitres de livres

CREPIN Jérôme, ROUX S., From microstructure to constitutive laws, in : *Full field measurements and identification in solid mechanics*, ed. M. Grédiac, F. Hild, ISTE/Wiley, 2013, p. 411-437

Actes de congrès

DURAND Julian, PROUDHON Henry, CAILLETAUD Georges, Contact

between rough surfaces : crystal plasticity influence on the contact tightness estimation, in : *10th world congress on computational mechanics*, 8-13 juillet 2012, Sao Paulo, ed. P.M. Pimenta, E.M.S. Campello, 12 p.

ROUFFIE Anne Laure, FOURNIER B., WIDENT P., ZIOLEK L., et al., Influence of the microstructure on the fracture mechanisms of ODS ferritic steels, in : *ECF 19. Fracture mechanics for durability, reliability and safety*, 26-31 août 2012, Kazan, 8 p.

CAILLETAUD Georges, BASSEVILLE Stéphanie, DURAND Julian, FEYEL F. et al., The mechanics of materials in contact problems, in : *ECF 19. Fracture mechanics for durability, reliability and safety*, 26-31 août 2012, Kazan, 10 p.

AMMAR Kais, FOREST Samuel, APPOLAIRE B., COTTURA M., LE BOUAR Y., FINEL A., The issue of plastic deformation inheritance in the phase field modelling of diffusion controlled growth of precipitates, in : *Journées d'automne 2012. Les transformations de phase à l'état solide*, 29-31 octobre 2012, Paris, 2 p.

De RANCOURT Victor, BUSO Esteban, FOREST Samuel, AMMAR Kais, APPOLAIRE B., Multiphysics coupling in heterogeneous media using the phase field method, in : *Journées d'automne 2012. Les transformations de phase à l'état solide*, 29-31 octobre 2012, Paris, 2 p.

DIRRENBERGER Justin, FOREST Samuel, JEULIN D., Effective properties of auxeties made using Selective Laser Melting, in : *Journées d'automne 2012. Les transformations de phase à l'état solide*, 29-31 octobre 2012, Paris, 2 p.

PIOZIN Emma, BRACHET J.C., GOURGUES LORENZON Anne Françoise, HOLLNER S., FOURNIER B., TOURNIE I., PINEAU André, Application de traitements thermo-mécaniques de type « ausforming » sur un acier martensitique 9Cr-1Mo-NbV (91), in : *Journées d'automne 2012. Les transformations de phase à l'état solide*, 29-31 octobre 2012, Paris, 2 p.

LUBIN Sophie, GOURGUES LORENZON Anne Françoise, BACROIX B., REGLE H., MONTHEILLET F., Approche expérimentale et micromécanique de la sélection de variants lors de la transformation bainitique d'un acier faiblement allié, in : *Journées d'automne 2012. Les transformations de phase à l'état solide*, 29-31 octobre 2012, Paris, 2 p.

Source : O. ADAM

Repas de fin d'année

C'est le 17 décembre que les personnels se sont retrouvés autour de tables joliment décorées et de mets succulents pour enterrer cette année 2012. Les animateurs de cette très sympathique après midi avaient concocté un quizz destiné à tester nos connaissances de l'histoire du laboratoire et de ces anecdotes inévitables qui la parsèment.

Avant les desserts, la traditionnelle bataille de serpentins et boules de papier a eu raison des derniers soucis. Merci à tous ces bénévoles pour ce moment très chaleureux.

Source : F. DI RIENZO



Séminaires

• **16/11/2012** : **Fissuration à haute température de superalliages utilisés dans les moteurs aéronautiques**

Introduction : Alain KOSTER - Cdm Mines ParisTech

Etat de l'art de l'analyse de la fissuration pour les parties chaudes des moteurs aéronautiques, Didier SORIA - responsable méthodes simulation fissuration 2D & 3D, SNECMA Villaroche

Growth and interaction of high temperature fatigue cracks nucleated from multiple holes under small or large scale yielding, Flora SALGADO - doctorante au CDM Mines ParisTech

Etude de la fissuration en plasticité généralisée de composants moteurs aérospatiaux, Auréliane HEUDT - doctorante au CDM Mines ParisTech

Influence d'un défaut sur la durée de vie des aubes monocristallines, Mélanie LEROY - doctorante au CDM Mines ParisTech

• **19/11/2012** : **Durée de vie des structures sous chargements complexes/Determination of service life in structures subject to complex loading environments**

Rolling contact fatigue life prediction: An experimental and numerical approach, Nagaraj K. ARAKER, *Mechanical and Aerospace*

Engineering, University of Florida

A microstructure sensitive model to account for the non-isothermal creep behaviour of Ni-based single crystal superalloys, Jonathan CORMIER, *Institute Pprime, ENSMA*

Numerical simulation of coupled phenomena: Application to crystal plasticity and regularised damage, Prajwal SABNIS, *Centre des Matériaux*

• **22/11/2012** : **Strategies for next generation advanced high strength sheet steel - Development for automotive applications**, Professeur Emmanuel DE MOOR - Colorado School of Mines (Advanced Steel Processing and Products Research Center)

• **23/11/2012** : **Superalliages à base nickel : microstructures et propriétés mécaniques**

Introduction : Loïc NAZÉ - Cdm Mines ParisTech

Les superalliages base Ni, matériaux indispensables dans les turbomachines aéronautiques, Jean-Yves GUEDOU - Responsable Recherche Matériaux et Procédés, Conseiller scientifique SNECMA – Groupe SAFRAN

Étude microstructurale et optimisation métallurgique du superalliage base nickel ATI 718Plus, Meriadeg REVAUD - Doctorant Cifre Sncema, groupe Safran / Cdm Mines ParisTech

AD730TM – Nouvel alliage base-Ni

développé pour les applications disques de turbine, Alexandre DEVAUX - Ingénieur métallurgiste, Aubert & Duval - groupe ERAMET

Effet des paramètres de traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques du superalliage base nickel N19, Alice DUMONT - Doctorante Cifre SNECMA, Groupe SAFRAN / Cdm Mines ParisTech

• **07/12/2012** : **Matériaux durs et Intégrité matière : applications au forage et à l'usinage**

Introduction ; Christophe COLIN – Cdm Mines ParisTech

Matériaux très durs, un enjeu majeur pour le forage pétrolier et minier, Alfazazi DOURFAYE- Responsable R&D, Varel Europe

Imbibition réactive, nouveau procédé de graduation de carbures cémentés pour améliorer la durée de vie des outils PDC, Olivier THER - Doctorant Cdm Mines ParisTech

Intégrité matière en usinage, Jean François CHABOT – Responsable de département Matériaux et Procédés, SNECMA – Groupe SAFRAN

Endommagement des outils WC-Co non revêtus lors du tournage de pièces en Ti-6Al-4V, Mickael RANCIC - Doctorant Cifre SNECMA, Groupe SAFRAN / LaBoMaP, Arts et Métiers / Cdm Mines ParisTech

[Source : semteam@mat.ensmp.fr](mailto:semteam@mat.ensmp.fr)

Repas de fin d'année



Visite de collégiens et lycéens

En 2012, comme les deux années précédentes, le Centre des Matériaux a organisé une Journée Portes Ouvertes pour des lycéens et des collégiens venus d'Essonne et de Seine et Marne. La date ne correspond pas à la semaine nationale de la Fête de la Science, mais qu'importe puisque un des buts est le même; permettre à de futurs étudiants de découvrir ce que sont les métiers de la recherche. Une grande partie des personnels techniques, ouvriers et administratifs, épaulés par quelques enseignants - chercheurs, avec le soutien de la Direction, se sont mobilisés pour cette journée exceptionnelle.

Chaque demi-journée a été l'occasion d'accueillir deux classes de trente élèves en provenance de quatre établissements différents.

Les visites ont débuté par une introduction d'une vingtaine de minutes, faite par un enseignant-chercheur, sous forme d'expériences ludiques illustrant les comportements mécaniques de différents matériaux, ainsi que leurs évolutions en fonction de la température.

Les élèves ont ensuite été répartis en petits groupes pour effectuer un parcours dans le laboratoire, accompagnés par des permanents du Centre, et découvrir ainsi six activités représentatives du Centre des Matériaux.

- L'atelier de fabrication mécanique. C'est dans cet atelier que sont fabriqués de nombreux appareillages nécessaires à l'étude expérimentale du comportement mécanique des matériaux : enceintes pour la réalisation d'essais sous atmosphère

contrôlée, machines d'essais mécaniques à faible charge, dispositifs de mesure de déformation, etc. C'est aussi dans cet atelier que des éprouvettes sont usinées dans les matériaux fournis par les partenaires industriels. Ce sont ces éprouvettes qui seront testées lors des essais mécaniques de caractérisation des matériaux.

- L'atelier de fabrication électronique. Des instruments servant à mesurer forces, déformations et températures sont ici mis à disposition des chercheurs. La conception, la calibration et la mise en œuvre de dispositifs électroniques de pilotage des machines d'essai sont expliquées.

- L'essai de traction. Une éprouvette plate en aluminium, préparée par l'atelier mécanique, est montée sur une machine de traction. Après une vidéo-projection expliquant les différentes étapes de l'évolution du comportement sous la forme d'une courbe déformation-contrainte, un essai réel est lancé. La réponse de l'éprouvette à l'application d'une déformation est enregistrée jusqu'à rupture.

- La microscopie optique. En premier lieu, on explique pourquoi il est nécessaire d'enrober, de polir puis de faire des attaques chimiques sur des échantillons matériaux variés, pour en observer la microstructure. On examine des lingots de coulées d'acier et de cuivre, ainsi que des sections de pièces d'euros pour révéler leur mode de fabrication.

- La microscopie électronique à balayage. Après une rapide description du principe de fonctionnement d'un microscope électronique, différentes observations (cheveu, insectes,...) sont réalisées à de forts grossissements. Les

surfaces de rupture de l'éprouvette précédemment testée sont également examinées.

- La simulation numérique. A travers l'évolution des moyens de calcul et de stockage des données, les performances d'un ordinateur parallèle sont comparées à celle d'un PC standard. Des calculs par éléments finis sont ensuite réalisés pour optimiser la conception d'une roue de VTT, dans le but de réduire les contraintes provoquées par un chargement donné.

Durant cette visite, les élèves ont pu apprécier la variété de métiers que pouvait offrir la recherche, d'ouvrier spécialisé à Bac+8, chacun de ceux-ci constituant un rouage nécessaire au bon fonctionnement d'un centre de recherche comme le notre

Sources : M. BOUSSUGE, S. BONNEVILLE, F. DI RIENZO

Soutenances de thèses

Propriétés effectives des matériaux architecturés

Justin DIRRENBARGER

10 décembre 2012

Les matériaux architecturés font émerger de nouvelles possibilités en termes de propriétés structurales et fonctionnelles, repoussant ainsi les limites des cartes d'Ashby. Le terme "matériaux architecturés" inclut toute microstructure conçue de façon astucieuse, de sorte que certaines de ses propriétés soient optimisées. Les exemples sont nombreux : composites fibreux et particuliers, matériaux cellulaires, structures sandwiches, matériaux tissés, structures treillis, etc. Un enjeu de taille pour l'emploi de tels matériaux est la prédiction de leurs propriétés effectives. Dans ce travail, deux types de microstructures sont considérées: des structures auxétiques périodiques et des milieux fibreux aléatoires. Les auxétiques sont des matériaux apparus au milieu des années 1980, présentant un coefficient de Poisson négatif. On attend des auxétiques qu'ils présentent des propriétés mécaniques améliorées, comme le module de cisaillement ou la résistance à l'indentation. Les milieux fibreux aléatoires considérés dans ce travail sont constitués de fibres 3D infinies interpénétrantes aléatoirement distribuées et orientées. Ce type de structure aléatoire est très défavorable à la détermination d'une taille de volume élémentaire statistiquement représentatif. Pour les deux types de matériaux, l'homogénéisation numérique à l'aide de la méthode des éléments finis est implémentée dans le but d'estimer les propriétés thermiques et mécaniques effectives.

Approche multi-échelles des problèmes de contact et d'étanchéité

Julian DURAND

14 décembre 2012

Il est communément admis aujourd'hui que le contact entre deux surfaces se compose en réalité d'une multitude de contact ponctuels entre des aspérités.

Cette considération amène à une surface de contact réelle significativement différente de l'aire de contact parfaite supposée dans la théorie de Hertz. De même, elle implique également la présence d'un espace libre entre les deux surfaces en contact. Dans cette situation, l'objectif principal de ces travaux de thèse est de développer des approches numériques permettant l'analyse du contact mécanique entre surfaces rugueuses dans le but de qualifier/quantifier l'étanchéité de ce contact rugueux. Deux approches différentes sont étudiées. La première consiste à analyser le contact mécanique entre une surface rugueuse et un plan rigide au moyen de la méthode des éléments finis et d'un nouveau modèle numérique. La seconde concerne l'estimation de la transmissivité d'un contact rugueux en considérant des simulations de l'écoulement d'un fluide au sein du champ des ouvertures présent entre les deux surfaces en contact. La comparaison de ces estimations numériques avec les résultats expérimentaux révèle des écarts importants. Dans le but de comprendre ces écarts, l'influence du modèle de comportement matériau dans de telles simulations est étudiée. La plasticité cristalline, mais également l'élévation de la température dégagée par déformation plastique seront considérées. La question de la représentativité de notre problème vis-à-vis de l'approche fluide sera également discutée.

Modélisation de la fragilisation due au gonflement dans les aciers inoxydables austénitiques irradiés

Xu HAN

14 décembre 2012

Au cours d'une irradiation neutronique à long-terme dans les Réacteurs à Eau Pressurisée (REPs), une modification importante du comportement mécanique des matériaux utilisés dans les internes de cuve (composés des aciers inoxydables austénitiques de la série 300) est observée, y compris un durcissement et un adoucissement induit par irradiation, une perte de la ductilité

et de la ténacité. Jusqu'à présent, beaucoup d'efforts ont été contribué pour identifier les effets d'irradiation sur l'évolution microstructurale du matériau (dislocations, boucles de Frank, cavités, ségrégation, etc.). Le gonflement induit par irradiation, considéré comme un facteur limitant la durée de fonctionnement des réacteurs, pourrait modifier les propriétés mécaniques des matériaux (plasticité, ténacité, etc), même conduire à une distorsion des structures du fait des modifications dimensionnelles entre les différentes composantes. L'objectif principal de ce travail de thèse est d'étudier qualitativement l'influence de l'effet du gonflement sur le comportement mécanique des matériaux irradiés. Un modèle micromécanique constitutif en grandes déformations basé sur les évolutions de la densité de dislocations et de défauts d'irradiation (boucles de Frank) est développé et implémenté dans les codes de calcul éléments finis ZéBuLoN et Cast3M. Les simulations numériques sont réalisées pour calculer les propriétés mécaniques d'un agrégat polycristallin. Par ailleurs, la technique d'homogénéisation est appliquée pour développer un modèle de type Gurson. Les simulations d'une cellule poreuse sont utilisés pour étudier le comportement mécanique des monocristaux poreux, en tenant compte des différents effets de la triaxialité, de la porosité et de l'orientation cristallographique, afin d'étudier l'effet de la présence des cavités sur la plasticité et la rugosité du matériau irradié à l'échelle polycristallin.

Caractérisation du comportement à rupture des alliages de zirconium de la gaine du crayon combustible des centrales nucléaires dans la phase post-trempe d'un APRP (Accident de Perte de Réfrigérant Primaire)

Mi HE

19 novembre 2012

Dans le cadre des études visant à garantir l'intégrité de la gaine du crayon combustible, EDF est amené à

Soutenances de thèses (suite)

caractériser la ductilité de la gaine après un Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). La thèse porte sur la caractérisation du comportement à rupture des gaines en Zircaloy-4 détendu pour lesquels les conditions d'APRP ont été simulées en laboratoire par une oxydation à haute température suivie d'un refroidissement. L'oxydation est effectuée à 1100°C et à 1200°C pour différentes durées ce qui conduit à des niveaux d'oxydation de 3% à 30% d'ECR (Equivalent Cladding Reacted). Deux types de refroidissement sont mis en œuvre : la trempe à l'eau et le refroidissement à l'air. Les gaines oxydées comportent deux couches fragiles, la couche de zircone externe ZrO₂ et la couche alpha(O), et une couche présentant une ductilité résiduelle, la couche ex-beta. Les gaines oxydées ont fait l'objet de caractérisations en microscope optique, par analyse à la microsonde et par nano-indentation. Une corrélation entre la teneur en oxygène et la nano-dureté et le module d'Young a été proposée. L'essai Expansion due à la Compression (EDC) a été développé avec une instrumentation par stéréo-corrélation d'images puis a été utilisé pour caractériser le comportement mécanique des gaines oxydées. Le comportement des gaines oxydées a été étudié à partir de l'analyse des courbes macroscopiques de l'essai EDC et à partir des observations des échantillons rompus ou pré-déformés. Un scénario de rupture des gaines oxydées a été proposé. Ce scénario a été validé d'une part par la réalisation d'essais sur gaines sablées ne comportant que la couche ex-? et d'autre part par la modélisation de l'essai par la méthode des éléments finis. Un critère de rupture des gaines oxydées a par ailleurs été établi. La modélisation du comportement et le critère de rupture proposés ont été validés par la modélisation des essais de compression d'anneau.

Formation de blisters d'hydrures et effet sur la rupture de gaines en Zircaloy-4 en conditions d'accident d'injection de réactivité

Arthur HELLOUIN DE MENIBUS
3 décembre 2012

Ce travail vise à étudier la rupture du gainage avec des essais mécaniques plus représentatifs des conditions RIA, en prenant en compte les blisters d'hydrures ainsi que le niveau élevé de biaxialité du chargement mécanique et des vitesses de déformation. Nous avons formé par thermodiffusion en laboratoire des blisters similaires à ceux observés sur des gaines de Zircaloy-4 irradiées en réacteur. Les caractérisations par métallographie, nanodureté, DRX et ERDA ont montré qu'un blister est constitué d'hydrures delta dont la concentration dans la matrice varie entre 80% et 100%, et que la matrice sous-jacente contient des hydrures radiaux. Nous avons modélisé la cinétique de croissance des blisters avec l'hystérésis de la limite de solubilité de l'hydrogène, puis défini le gradient thermique seuil permettant leur formation. Notre étude sur le comportement dilatométrique du zirconium hydruré montre le rôle important de la texture cristallographique du matériau, ce qui peut expliquer des différences de morphologie des blisters. En parallèle, des essais suivis par caméra infrarouge ont montré que des vitesses de déformation supérieures à 0,1/s induisent des échauffements locaux importants qui favorisent la localisation précoce de la déformation. Enfin, nous avons optimisé l'essai d'Expansion Due to Compression pour atteindre un niveau de biaxialité de déformation plane (essais HB-EDC et VHB-EDC), ce qui réduit fortement la déformation à rupture à 25°C et 350°C, mais seulement en l'absence de blisters. Un critère de rupture est proposé pour rendre compte de la baisse de ductilité des gaines en Zircaloy-4 non irradiées en présence de blisters.

Amorçage des fissures de corrosion sous contrainte dans les aciers inoxydables austénitiques pré-déformés et exposés au milieu primaire des réacteurs à eau sous pression

Pauline HUGUENIN
21 décembre 2012

Les aciers inoxydables austénitiques de type 304L et 316L sont largement employés dans le circuit primaire des centrales nucléaires à Réacteurs à Eau sous Pression (REP). Le retour d'expérience indique la présence d'un nombre limité de fissures intergranulaires dues à la corrosion sous contrainte (CSC) sur des composants en acier inoxydable écroui. Il a été démontré qu'une pré-déformation importante associée à un chargement cyclique favorise la propagation des fissures de CSC. L'objectif de l'étude est d'améliorer la compréhension du rôle de la pré-déformation par traction ou par laminage sur les mécanismes d'amorçage de la CSC pour les aciers inoxydables austénitiques. Le comportement mécanique des matériaux écrouis a été caractérisé et des essais d'amorçage en milieu primaire simulé ont été réalisés sur des éprouvettes entaillées. L'ensemble des essais d'amorçage réalisés a confirmé un fort effet du trajet de chargement sur la sensibilité à l'amorçage des matériaux étudiés, quel que soit le niveau de pré-déformation. Un critère global a été proposé pour réunir les deux aspects de l'amorçage de la fissuration que sont la densité de fissures et leur profondeur. Ce critère est utile pour caractériser l'amorçage tandis que la profondeur maximale de fissure est le paramètre pertinent pour définir la transition entre propagation lente et propagation rapide. Des cartes de sensibilité à l'amorçage

Soutenances de thèses (suite)

vrai ont été établies. Une profondeur critique de fissure de 10 à 20 micron-m a été déterminée pour les aciers 316L A et B pré-déformés par laminage. Elle est comprise entre 20 micron-m et 50 micron-m pour les matériaux pré-déformés par traction. Une ébauche de modèle d'ingénierie applicable aux aciers inoxydables austénitiques a été proposée : l'effet de la température est négligeable dans la gamme 290°C-360°C et l'impact de la contrainte sur le temps pour obtenir la transition varie comme $(\sigma_{max}/R_{p0.2}, T^{\circ}C)^{11.5}$. L'effet du trajet de chargement ainsi que de l'écroutissage de surface dû à l'usinage sont intégrés indirectement à l'indice de contrainte, à ce stade du modèle. L'effet « matériau » observé dans cette étude tient principalement à l'effet du trajet de déformation. La puissance élevée de la dépendance à la contrainte traduit l'intégration de différents paramètres favorisant la localisation de la déformation. Pour cette raison, il sera nécessaire de définir le champ des contraintes locales pour parvenir à une modélisation plus physique.

Caractérisation métallurgique et modélisation de la tenue en fluage à 550°C des liaisons soudées en acier Grade 92

Charlotte KALCK
6 décembre 2012

Ce projet de thèse s'inscrit dans le cadre du développement de la future génération de réacteurs nucléaires, la génération IV. L'acier Grade 92, appartenant à la famille des aciers à 9-12% de chrome, est un candidat potentiel pour des composants de cette future génération de centrales. Ces structures sont assemblées par soudage. L'objectif de ce projet est de caractériser expérimentalement et de modéliser le comportement en fluage à 550°C de ces

joints soudés en acier Grade 92 (9Cr-0,5Mo-1,8W-V-Nb). L'une des grandes problématiques des soudures en acier à 9 % de chrome est leur sensibilité à la rupture de type IV (rupture en zone intercritique (ICHAZ) ou dans la zone à petits grains (FGHAZ)) qui se produit généralement lors de sollicitations en fluage à basses contraintes et à hautes températures. Deux produits d'apports sont utilisés pour l'étude. Les soudures sont issues de l'assemblage par procédés TIG de deux tubes en position bout à bout. Une campagne d'essais de fluage à 550 °C sur éprouvettes travers joint en acier Grade 92 a été menée. Les expertises réalisées sur les éprouvettes de fluage indiquent que la rupture se produit en ICHAZ y compris pour les essais de fluage les plus courts (moins de 1000h). La modélisation du comportement en fluage du joint soudé complet a nécessité au préalable d'obtenir un modèle de comportement de chaque zone, en particulier de l'ICHAZ et de la zone fondue. Des essais de fluage sur des éprouvettes entaillées prélevées dans le joint ont permis d'accéder au comportement en fluage de ces deux zones. Une méthode complémentaire a été utilisée afin d'obtenir le comportement en fluage de l'ICHAZ. Cette méthode consiste à réaliser des essais de fluage sur des éprouvettes en microstructure de synthèse de la zone intercritique. Une caractérisation microstructurale fine de différentes zones de la soudure a été entreprise. Afin de comprendre les raisons de la faible résistance mécanique en fluage de l'ICHAZ, les microstructures de l'ICHAZ et du métal de base ont comparées à différentes échelles (MEB, EBSD, MET). Cette comparaison a également permis de valider la microstructure de synthèse. La caractérisation microstructurale des deux zones ne révèle pas de différences significatives ni sur la matrice de martensite revenu, ni en termes de précipitation. L'origine de sa moindre résistance à l'écoulement viscoplastique n'est donc pas résolue. Un effet de structure lié aux différences de

propriétés mécaniques des zones de la soudure, est quantitativement étudié par modélisation des essais de fluage sur joint complet

Influence du vieillissement statique sur la transition ductile-fragile des aciers au C-Mn

ANTHONY MARAIS
26 novembre 2012

Les aciers ferritiques pour structures industrielles présentent une transition fragile-ductile de ténacité et de résilience avec leur température. Leur résistance à la rupture fragile joue un rôle essentiel dans la certification de la sécurité des structures industrielles importantes. De nos jours, le souci de performance et de longévité sont des points clés pour des acteurs majeurs comme EDF. Dans ces études de transition ductile-fragile, de ténacité et de résilience, la ténacité est prédite à partir de la résilience. Plusieurs travaux antérieurs ont déjà montré que la probabilité de rupture par clivage peut être correctement décrite dans le palier fragile par une approche locale de la rupture. Mais ces études supposent que le matériau ne subit pas de vieillissement sous déformation, ce qui est en fait rarement pertinent pour les aciers bas carbone et peu calmés. Le travail a consisté d'une part à caractériser le comportement et d'autre part à en proposer une modélisation robuste et explicite des phénomènes observés. La caractérisation a consisté en la réalisation d'essais de traction entre -150°C et 20°C à plusieurs vitesses de déformation. Un modèle capable de simuler le vieillissement statique est identifié en mettant en place une stratégie adéquate et systématique. Des essais de résilience permettent de construire la courbe de transition ductile-fragile du matériau pour différentes conditions afin de comprendre et d'observer l'influence du vieillissement statique sur la rupture. Enfin, la modélisation de la rupture fragile a été décrite pour toutes les conditions expérimentales testées en utilisant le

Soutenances de thèses (suite)

modèle de comportement développé et identifié dans la partie précédente afin de prédire numériquement la transition pour les différentes conditions du matériau.

Simulation numérique multi-échelles du comportement mécanique des alliages de titane bêta-métastable Ti5553 et Ti17

GUILLAUME MARTIN
10 décembre 2012

Le but de ce travail de thèse est de mieux comprendre les mécanismes de déformation à température ambiante dans les alliages de titane bêta-métastable Ti17 et Ti5553. Les microstructures étudiées sont composées de grains bêta transformé, dans lesquels la phase alpha peut précipiter, selon les relations de Burgers, sous la forme de douze variants différents. Une approche multi-échelles est donc préconisée avec trois niveaux représentatifs: macroscopique, mésoscopique (ex-grains bêta), et microscopique (variants alpha et matrice bêta de chaque grain). Différents modèles à champs moyens sont adaptés pour reproduire le comportement mécanique du Ti17 et du Ti5553. Ces modèles impliquent deux transitions d'échelle, et sont basés sur l'homogénéisation des comportements locaux, avec plusieurs manières de représenter les interactions intergranulaires. Les relations entre microstructures et propriétés mécaniques sont également considérées. Les modèles les plus complexes développés dans cette étude vont permettre de simuler l'anisotropie élastique et l'écoulement visqueux de chaque variant alpha (hcp) et de chaque matrice bêta (bcc), en employant la plasticité cristalline avec des écrouissages de type cinématique et isotrope. L'identification des paramètres matériaux est faite à partir d'une vaste base de données expérimentale provenant du projet PROMITI. Pour comprendre le rôle de chaque phase dans le processus de déformation, un

calcul EF a également été fait afin de reproduire l'essai de traction sur une très fine éprouvette plate. Dans cette étude, le niveau mésoscopique est explicitement représenté en reprenant fidèlement la géométrie et l'orientation cristallographique de chaque grain bêta transformé. Des comparaisons entre expérience et simulation sont faites à l'échelle macroscopique pour les courbes contrainte - déformation, ainsi qu'au niveau mésoscopique, en considérant les champs de déplacement hors-plan et les champs de déformation.

Etude et modélisation du vieillessement hygrothermique de composites polyphthalamides à fibres de verre courtes

Laurent MAZE
20 décembre 2012

En milieu humide et soumis à des variations de pression et de température, les équipements des réseaux de distribution d'eau font l'objet de fortes agressions de l'environnement. Historiquement métalliques, ces équipements et notamment les compteurs d'eau, exploitent de plus en plus les atouts des matériaux composites. Au cours de ces travaux, nous avons étudié et modélisé les effets d'un vieillissement hygrothermique sur deux composites injectés (fibres de verre courtes) à matrice polyamide haute performance (polyphthalamide). Les différences entre les deux matériaux sont minimales et se situent au niveau de la matrice avec des cycles aromatiques plus ou moins nombreux. Cette étude commence par l'analyse des phénomènes de diffusion de l'eau pour nos deux matériaux avec la détermination des cinétiques de sorption sous différentes conditions de vieillissement. En parallèle, des essais de DMTA ont été menés pour suivre l'évolution de la température de transition vitreuse. Nous avons ainsi pu conclure quant au matériau répondant au mieux au cahier des charges de l'industriel. De ces essais, nous avons établi dans le cas d'un vieillissement

réversible, la dépendance de la diffusivité à la température mais surtout à la concentration en eau. Cela conduit à un modèle couplé implémenté à la fois en différences et en éléments finis. L'objectif final est de prédire le comportement global du matériau dans des pièces à géométrie complexe à l'aide d'un calcul couplé diffusion/mécanique. La prise en compte de la distribution d'orientation locale des fibres est alors essentielle pour traduire le comportement mécanique anisotrope de tels matériaux. Pour cela, nous avons déterminé les tenseurs d'orientation en analysant des cartographies réalisées au Microscope Electronique à Balayage. Pour pallier les échecs des méthodes traditionnelles dans le cas des taux de renfort élevés accompagnés d'une anisotropie, le développement d'une nouvelle procédure d'analyse d'image a été nécessaire. Grâce à la connaissance des champs de température, concentration et de l'anisotropie, il est possible de prédire les propriétés du matériau pour des pièces à géométrie complexe.

Approche probabiliste du comportement mécanique des composites thermoplastiques assemblés par soudage laser.

Mamane OUMAROU
9 novembre 2012

Les matériaux composites à matrice thermoplastique occupent de plus en plus un large domaine d'application grâce à leur aptitude à être recyclés et à être assemblés par fusion du polymère, encore appelée soudage. Parmi ces modes d'assemblage, le soudage laser propose de meilleures alternatives. Car, outre le fait qu'elle assure une meilleure tenue mécanique et un meilleur aspect esthétique, cette technique d'assemblage ne crée pas d'endommagement au sein du composite, à l'instar de certaines méthodes comme le rivetage, le vissage ou le boulonnage. L'objectif de ce travail est de proposer un modèle de rupture probabiliste de l'assemblage par

Soutenances de thèses (suite)

faisceau laser d'un composite thermoplastique à fibres continues. Une description fine du matériau est d'abord effectuée par une approche multi-échelles dont le but était de pouvoir prédire le comportement macroscopique du composite de base connaissant les fluctuations locales de sa microstructure. La caractérisation mécanique de l'assemblage est ensuite effectuée par des essais multiaxiaux au moyen d'un dispositif spécifiques (Arcan-Mines) qui prend en compte l'état de confinement du joint soudé. Ce qui a permis de proposer un modèle de comportement élasto-plastique basé sur le critère de Drucker-Prager généralisé. Des tests par émission acoustique ont permis de faire l'hypothèse de l'existence d'un maillon faible au sein du joint soudé. La rupture est alors évaluée par le modèle statistique de Weibull. Un critère de rupture probabiliste basé sur le premier et le second invariant du tenseur des contraintes est finalement proposé.

Caractérisation et modélisation du comportement mécanique à haute température des aciers ferritiques renforcés par dispersion d'oxydes

ANTONIN STECKMEYER

28 novembre 2012

Le renforcement par dispersion d'oxydes nanométriques permet, d'une manière générale, d'améliorer la résistance mécanique des matériaux métalliques. Il autorise donc une augmentation de leur température maximale d'utilisation. De nombreux travaux de recherche sont menés au Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives sur les aciers ODS, pour Oxide Dispersion Strengthened steels. S'inscrivant dans le cadre du développement du nucléaire civil de quatrième génération, ces travaux ont pour but de qualifier un matériau pouvant être utilisé en tant que matériau de gainage combustible à une température de 650°C. Ce travail de thèse a pour objectif d'améliorer la

compréhension des propriétés mécaniques des aciers ODS, en cherchant d'une part à caractériser et à modéliser leur comportement en fluage, et d'autre part à caractériser leur anisotropie de comportement et à en identifier l'origine. Pour cela, de nombreux essais mécaniques ont été effectués entre 20°C et 900°C sur une nuance d'acier ODS ferritique de composition nominale Fe-14Cr1W0,26Ti + 0,3Y2O3. Cette nuance a été élaborée au CEA, par mécanosynthèse puis extrusion à chaud, sous la forme d'une barre ronde. Les résultats obtenus démontrent la grande résistance mécanique à haute température de l'acier ODS étudié. Ils mettent également en évidence une forte dépendance de la ductilité et de la résistance du matériau vis-à-vis de la vitesse de sollicitation. Sur la base des différentes caractérisations expérimentales réalisées, un modèle de comportement macroscopique uniaxial a été développé. S'appuyant sur la description de trois écrouissages cinématiques et d'un terme de restauration statique, ce modèle démontre une capacité remarquable à reproduire le comportement mécanique du matériau en traction, en fatigue, en fluage et en relaxation. Par ailleurs, la caractérisation de l'anisotropie mécanique de la nuance d'acier ODS étudiée s'avère dépendre de la température. Deux modélisations polycristallines différentes ont été mises en place afin de reproduire cette anisotropie de comportement à partir des textures cristallographique et morphologique du matériau. Le désaccord observé entre les prévisions de ces modèles et les résultats expérimentaux conduit à formuler d'autres hypothèses sur la déformation des aciers ODS.

Modélisation numérique de la propagation et de la bifurcation des fissures dans les superalliages monocristallins à base de nickel

Prajwal SARNIS

16 novembre 2012

Le but principal de cette thèse est de développer un modèle numérique pour modéliser les phénomènes de bifurcation et du branchement des fissures. Pour réaliser cet objectif, il était indispensable de posséder un modèle permettant un couplage fort entre le modèle de Plasticité cristalline et celui de l'Endommagement régularisé. Dans un premier temps, quelques outils de post-traitement ont été développés pour analyser les systèmes de glissement actifs. Ces outils ont été utilisés sur des simulations d'éprouvettes réelles, et comparés à des résultats expérimentaux. Par ces comparaisons, l'application du modèle de Plasticité cristalline aux superalliages monocristallins a été validée. Ce modèle a ensuite été couplé avec le modèle d'endommagement régularisé. Le couplage a été réalisé dans les deux sens, c'est-à-dire que l'évolution de la plasticité a une influence sur l'endommagement et vice-versa. Le nouveau modèle peut être implémenté simplement, avec la méthode traditionnelle des Éléments Finis. Des expériences étudiant la propagation de fissure sous des chargements de types différents ont été simulées à l'aide de ce nouveau modèle : éprouvettes CT, fissuration en Mode II et rupture en fluage. Une méthode pour l'identification des paramètres matériaux a également été proposée.

Soutenances de thèses (suite)

Modélisation de la durée de vie d'un revêtement aluminifère en conditions de sollicitations thermomécaniques

Pierre SALLOT

29 novembre 2012

Cette étude a pour objectif de modéliser la durée de vie d'un revêtement NiAlPt déposé sur un substrat monocristallin base Ni (AM1). De façon standard, la durée de vie des revêtements est évaluée en mesurant l'évolution de la masse d'un échantillon revêtu au cours d'un essai de cyclage thermique. Des modèles de durée de vie fondés sur ces mesures sont très bien adaptés aux revêtements pour lesquels la couche d'oxyde est peu adhérente, ce qui n'est pas le cas pour le revêtement NiAlPt objet de cette étude. D'autre part, il est impossible d'obtenir des courbes de gain de masse pour des conditions de chargement thermo-mécaniques complexes, tels que ceux supportés par une aube aéronautique en service. C'est pourquoi nous avons choisi d'étudier l'évolution de la microstructure du revêtement au cours du vieillissement et d'établir des liens entre cette évolution microstructurale et la durée de vie évaluée sur des essais de cyclage thermiques.

La base d'essai réalisée regroupe des essais d'oxydation cycliques à différentes températures et fréquences de cyclage ainsi que des essais de fatigue mécano-thermique, en phase, hors-phase et complexes. Pour chaque condition testée, des essais interrompus ont permis d'estimer les évolutions microstructurales en fonction des conditions de chargement thermo-mécanique jusqu'à des temps relativement longs. Nous avons en particulier estimé les évolutions de rugosité de surface, d'épaisseur de la couche d'interdiffusion entre le revêtement et le superalliage, et la fraction de phase gamma' transformée. Ces deux paramètres sont corrélés respectivement au maximum de la courbe de gain de masse et au nombre de cycle nécessaire pour atteindre un gain de masse nul, pour le système

étudié en oxydation cyclique.

Nous avons modélisé l'évolution de l'épaisseur de la couche d'interdiffusion en fonction des conditions de chargement thermo-mécaniques. La transformation de phase a été modélisée à l'aide d'un bilan de flux de matière dans le revêtement fonction de l'intégrité de la couche d'oxyde de croissance et de la rugosité de surface. Ces deux modèles ont permis d'estimer l'évolution microstructurale du revêtement en fonction des différents paramètres de chargement thermo-mécanique, et donc d'estimer une durée de vie basée sur ces critères.

Comportement et endommagement des alliages d'aluminium 6061-T6 : approche micromécanique

Yang SHEN

18 décembre 2012

L'alliage d'aluminium 6061-T6 a été retenu pour la fabrication du caisson-cœur du futur réacteur expérimental Jules Horowitz (RJH). L'objectif de cette thèse est de comprendre et modéliser le comportement et l'endommagement de cet alliage en traction et en ténacité, ainsi que l'origine de l'anisotropie d'endommagement. Il s'agit de faire le lien entre la microstructure et l'endommagement du matériau à l'aide d'une approche micromécanique. Pour ce faire, la microstructure de l'alliage, la structure granulaire et les précipités grossiers ont été caractérisés en utilisant des analyses surfaciques (Microscopie Électronique à Balayage) et volumiques (tomographie/laminographie X). Le mécanisme d'endommagement a été identifié par des essais de traction sous MEB in-situ, des essais de tomographie X ex-situ et des essais de laminographie X in-situ pour différents taux de triaxialité. Ces observations ont notamment permis de montrer que la germination des cavités sur les précipités grossiers de type Mg₂Si est plus précoce que sur les intermétalliques au fer. Le scénario identifié et les grandeurs mesurées ont

ensuite permis de développer un modèle d'endommagement couplé, basé sur l'approche locale de la rupture, de type GTN intégrant la germination, la croissance et la coalescence des cavités. Le lien entre l'anisotropie d'endommagement et de forme/répartition des précipités a pu être montré. Cette anisotropie microstructurale modifie les mécanismes : Pour une sollicitation dans le sens long l'endommagement est majoritairement intergranulaire alors que dans le sens travers on observe un endommagement mixte intergranulaire et intragranulaire. La prise en compte des mesures de l'endommagement dans la simulation a permis d'expliquer l'anisotropie d'endommagement. Ce travail servira de référence pour les études futures qui seront menées sur le matériau irradié.

Etude du comportement mécanique à chaud de l'acier P91 Vers la compréhension du rôle des mécanismes intra/intergranulaires sur la tenue en fluage: Application aux structures soudées

Mathieu TOUBOUL

27 novembre 2012

Il s'agit dans ce travail de développer une démarche multiéchelles, afin d'identifier puis de modéliser le comportement mécanique d'un matériau à gradient de propriétés (un cordon de soudure) en relation avec les hétérogénéités microstructurales responsables de la déformation et de l'endommagement par fluage des aciers P91, matériaux retenus pour des applications de tenue mécanique à chaud des centrales thermiques à flamme. Cette étude porte sur l'utilisation des techniques de mesure de champs cinématiques par corrélation d'images couplées aux simulations numériques par éléments finis. Les différentes zones d'intérêt sont : le métal de base, l'ICHAZ (intercritical heat affected zone), la FGHAZ (fine grain heat affected zone), la CGHAZ (coarse grain heat affected zone) et le métal

Soutenances de thèses (fin)

fondus. L'identification a porté dans un premier temps sur le comportement en traction et traction-relaxation à l'ambiante et à 625°C. Cette phase a permis d'établir une loi de comportement pour chacune des zones du joint soudé et de prédire la zone de localisation de déformation pour une gamme assez large de vitesse de sollicitation. Une attention particulière a ensuite été portée aux essais de fluage, pour lequel le glissement intergranulaire joue un rôle essentiel dans le

comportement du cordon de soudure et notamment dans l'ICHAZ. Afin de mettre en évidence le glissement intergranulaire, une technique de microlithographie a été adoptée. L'effet de ce mécanisme sur le comportement macroscopique et à l'échelle locale a été étudié au moyen de simulations numériques par éléments finis avec introduction de zones cohésives. Pour cela une loi cohésive a été élaborée et validée sur une configuration simplifiée à quatre grains. Ce modèle permet

également de rendre compte de la transition fluage dislocation – fluage diffusion en retardant le déclenchement du glissement aux joints de grains quand la vitesse de sollicitation augmente. Cette étude est financée par la Chaire EDF-GDF-SUEZ-GRT gaz - ENSMP –ENPC sur la «durabilité des matériaux et des structures pour l'énergie».

Sources : les doctorants concernés

Symposium pour Gérard LESOULT

La SF2M et le CNRS ont organisé le 12 Septembre 2012, dans la toute nouvelle école des mines de Nancy, une journée en l'honneur de Gérard LESOULT, jeune retraité de cette école sœur et pionnier du Centre des matériaux.

Gérard a à son actif 45 ans de recherche orientée en solidification et ses travaux de recherche sont internationalement reconnus (John CHIPMAN Award 1990 de l'Iron and Steel Society de l'AIME, Grand Prix de la Recherche 1997 de la Société Industrielle de l'Est, Médaille Georges CHAUDRON 2001 de la Société Française de Métallurgie et de Matériaux), mais sa préférence scientifique va à la Thermodynamique à laquelle il a consacré un gros et bel

ouvrage ('Thermodynamique des matériaux : De l'élaboration des matériaux à la genèse des microstructures' édité en 2010 aux éditions PPUR).

Venu de Nancy avec Michel TURPIN, au début du centre à Evry, il assure la germination et croissance d'un groupe Solidification, transplanté à Nancy en 1981. On peut encore identifier des rejets de ces études dans nos études de fusion/solidification sous laser (slm) ou études de pièces de fonderie ou dans les études d'eutectiques céramiques...

Une cinquantaine de ses amis, collègues, doctorants des deux écoles et ses partenaires européens du groupe d'étude

de la solidification, l'entouraient pour évoquer le passé et faire des propositions pour l'avenir (dans le cadre du GDR CNRS Solidification SAM auquel nous participons, les 13 et 14 septembre).

Le principal message que Gérard LESOULT nous fait passer concerne les relations Industrie /Monde universitaire et la formation par la recherche. « Apprendre à apprendre pour aider à mieux agir », telle est la formule résumant la mission de l'enseignant chercheur dans le cadre de la recherche orientée.

Source : Y. BIENVENU

La Newsletter du Centre des Matériaux

Mines Paristech - Centre des Matériaux P.M. FOURT
ARMINES - UMR CNRS 7633
B.P. 87
91003 Evry cedex
<http://www.mat.ensmp.fr>
Téléphone : (+ 33) 1 60 76 31 40
Télécopie : (+33) 1 60 76 31 50
Messagerie : francoise.di_rienzo@mines-paristech.fr

Equipe rédactionnelle

Rédactrice en Chef : Françoise DI RIENZO
Responsable de production : Jacques BESSON
La Page du Cdm...Le Point ! : Odile ADAM
Photographies : Maria BETBEDER (sauf mention contraire)
Comité de relecture : Françoise DI RIENZO, Yves BIENVENU



<http://www.mat.ensmp.fr>

**Envie de publier un article sur un sujet qui vous passionne, envie de présenter un point de votre thématique de recherche, d'informer, de vulgariser ?
Le Cdm Tribune est là pour ça et vous écoute ! N'hésitez plus, écrivez.**