



EDITO

Par **Marc COURTEAUX**

Animateur Conseil Scientifique A3TS

2014 Nouvelle Année ?

Au nom du conseil d'administration et du comité scientifique je vous souhaite les meilleurs vœux de santé et de réussite dans vos projets. Après une année 2013 riche en événements pour l'A3TS, l'année 2014 s'annonce tout aussi importante et intéressante.

2014, année Ambition : Avec le congrès national qui se prépare pour le mois de juin, la recette 2013 a été reconduite mais avec cette ambition de fournir des nouvelles orientations techniques engagées par nos métiers vis-à-vis des nouvelles contraintes qui leurs sont imposées.

2014, année Transition : Le conseil scientifique de l'A3TS a redéfini son périmètre d'activité afin de donner une vision à plus longue échéance des thématiques de l'A3TS tout en remobilisant ses membres. C'est encore un nouveau souffle donné à la profession.

2014 année Evolution : Le congrès CIMATTS qui n'a pas forcément trouvé sa place en 2013 a été reformulé et recadré pour répondre aux besoins du métier et à ses contraintes. La journée **MATERIAUX, RECHERCHE ET PROCÉDES** est née et avec elle une volonté de proposer de nouvelles thématiques sans oublier une journée spécifique et innovante qui sera consacrée à la peinture.

2014 année Régions : La journée de la section Ile de France sur le durcissement superficiel et les journées de PAU sur la projection thermique, ainsi que bien d'autres sont les preuves du dynamisme des régions et du niveau technique extrêmement élevé qui se renouvelle sans cesse.

2014 année Passion : Par ceux qui soutiennent l'A3TS, qui participent aux différents sections et comités et l'ensemble des acteurs de la filière restent passionnés par nos métiers du traitement de surface et du traitement thermique sans oublier les formations permettant un renouvellement d'un très haut niveau dans nos PME, PMI mais aussi les grands groupes.

Alors 2014 une nouvelle année ?

SOMMAIRE

INFOS TECHNIQUES :

Journée A3TS - Procédés de mise en compression des surfaces.
03/10/2013 PARIS page 2

HärteraiKongress WIESBADEN
09-11-10/2013 (Allemagne) page 24

Journée A3TS Sud-Est - Revêtements DLC, intérêts tribologiques et applications »
24/10/2013 – LYON page 31

BRÈVES page 39

CONGRÈS page 39

DU CÔTÉ DES LABORATOIRES page 40

INNOVATIONS page 42

REVUE DE PRESSE page 43

INFOS TECHNIQUES

JOURNEE TECHNIQUE A3TS

« Procédés de mise en compression des surfaces » 3 octobre 2013 à Paris

L'A3TS organisait le 3 octobre dernier sur une proposition de SAFRAN une journée de réflexion sur la mise en compression des surfaces métalliques

Introduction de présentation

Les problématiques environnementales et énergétiques actuelles des grands secteurs industriels (aéronautique, automobile, nucléaire,...), conduisent les bureaux d'étude à concevoir des équipements associant performance et gain de masse.

En parallèle, les conditions de sollicitation de ces équipements sont de plus en plus sévères. Pour toutes ces raisons, les procédés permettant de générer des champs / profils de contraintes dans les matériaux s'opposant à la fissuration des pièces connaissent un essor important et leur emploi a tendance à se généraliser dans les bureaux d'études et de conception.

Certains procédés sont matures industriellement depuis de nombreuses années mais nécessitent de nouvelles optimisations et d'autres sont en cours de développement ou à développer pour répondre aux nouveaux défis industriels des prochaines années.

Cet évènement se veut être l'occasion de réaliser un état de lieu des travaux de recherche et développement et des pratiques et besoins industriels liés à ce domaine.

Compte rendu de la journée

Les 12 communications présentées ont recueillies l'attention d'une soixantaine de participants universitaires, utilisateurs et prestataires. Les discussions nombreuses et pointues ont démontré s'il en était besoin l'intérêt porté à cette technologie du renforcement des organes mécaniques par la mise en compression de leurs surfaces à l'aide de procédés par impact.

Les communications se sont réparties principalement en 3 domaines : calcul et modélisation, mesure des contraintes et applications, procédés. Nous donnons ici les résumés de ces interventions

1. MODELISATION D'IMPACTS MULTIPLES POUR LA PREDICTION DES DISTORSIONS, CONTRAINTES RESIDUELLES ET RUGOSITES INDUITES PAR LE GRENAILLAGE ULTRASONORE. T. CHAISE, D. NELIAS (INSA LYON)

La modélisation des procédés de mise en compression implique des simulations coûteuses du fait du grand nombre d'évènements individuels à prendre en compte (impacts dans le cas du grenailage). L'utilisation d'une méthode semi analytique est proposée pour la modélisation des procédés de type roulement (galetage) ou grenailage. Cette méthode appelée SAM (Semi Analytical Method) permet de simuler de manière robuste et précise des conditions de contact complexes tout en garantissant des temps de calcul réduits par rapport aux méthodes de simulation classiques de type éléments finis. De plus, la prise en compte de comportements non linéaires (plasticité, endommagement, revêtements) est aujourd'hui possible.

Une méthodologie est proposée sur un cas de grenailage ultrasonore. La première étape consiste à prédire par simulation numérique la vitesse des impacts sur la pièce, en tenant compte du coefficient de restitution aux différents contacts dans la chambre. L'effet moyen du grenailage est ensuite obtenu par simulation d'un nombre réduit d'impacts (fig.1.1) sur une géométrie de référence. L'effet du taux de recouvrement a été évalué et montre qu'au-delà de 125% l'effet était négligeable. La profondeur affectée est impactée par le diamètre des billes, les plus petites billes ont un impact moindre. Le modèle est ensuite projeté dans la géométrie réelle comme sur une jauge Almen (fig.1.2). Les contraintes résiduelles, les déformations structurales ainsi que l'état de surface (fig.1.3) peuvent ainsi être prédits. Des exemples pour des pièces minces réelles ont été donnés.

Reference area: triangle passing by the center of the 3 first impacts

$$c = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \left(\frac{a^*}{d} \right)^2 = \frac{A_{\text{impacted}}}{A_{\text{reference}}}$$

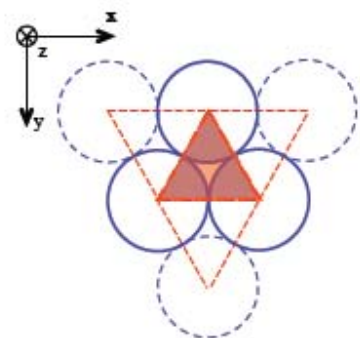


Figure 1.1 Géométrie de référence de 3 impacts dans le cas du grenailage par ultrasons

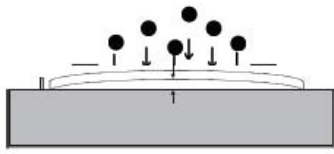
■ Application – Measuring the deflection of an Almen sample

10 shots - 100Cr6 - R=2mm

Sample: 60x18x2mm³– Inco600

Chamber: 80x40x50mm³

$v_{sonotrode}^{max} = 4 \text{ m/s}$



Max.
difference=4.25%

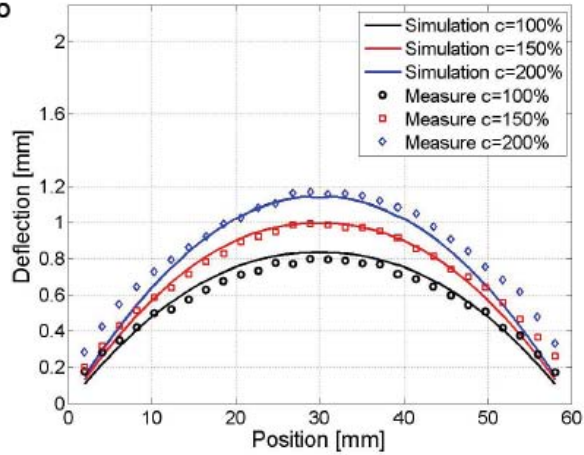
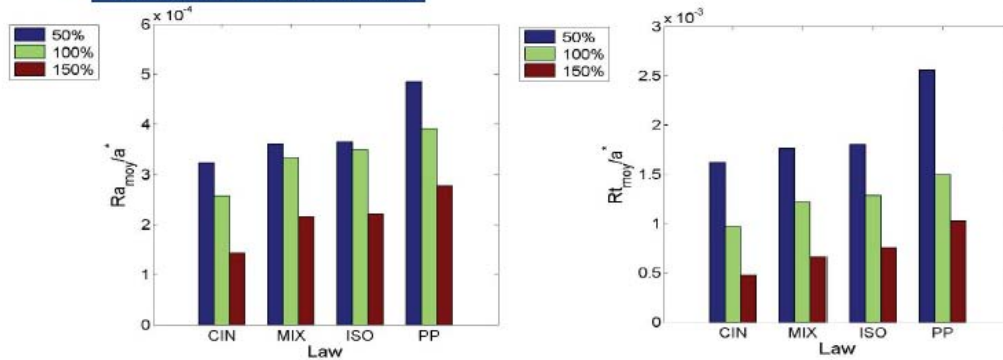


Figure 1.2 Application de la méthode sur une jauge Almen

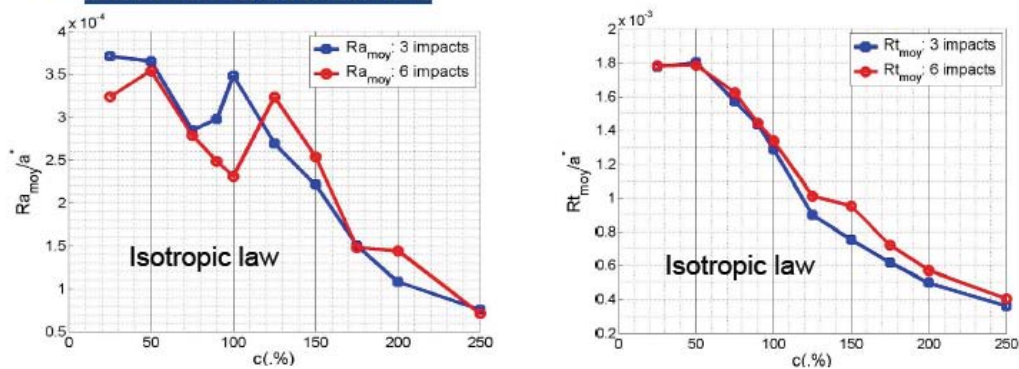
■ First order parameters



- Peaks and valleys are higher for Perfectly plastic law, this for all coverage rate
- Low coverage rate (c=50%) gives great peaks and/or large valleys, which are more accentuated for the perfectly plastic law

Influence of number of simulated impacts and coverage rate

■ First order parameters



- Negligible effect of the number of simulated impacts on first order parameters
⇒ 3 impacts are sufficient
- Roughness decreases with increasing coverage

Figure 1.3. Etude de l'état de surface en fonction du nombre d'impacts

La méthode est appliquée à l'effet du cumul du grenailage par ultrasons et d'un choc laser (fig. 1.4)

Étude de l'effet cumulé du grenailage et du choc laser

- Objectif : étude des contraintes résiduelles et distorsions d'une pièce réelle après traitement de grenailage US et laser

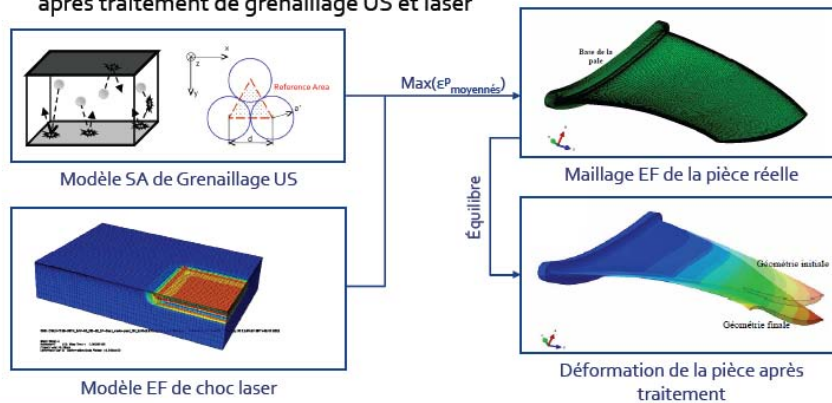
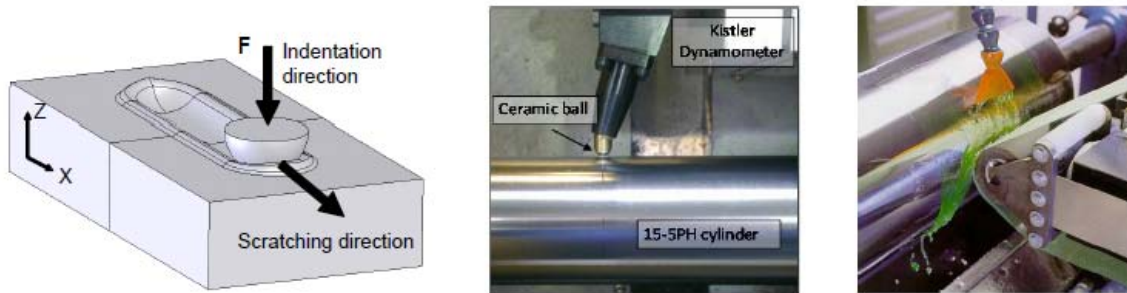


Figure 1.4 Cumul grenailage et choc laser

2. ANALYSE DES CONTRAINTES RESIDUELLES GENEREES PAR LES TRAITEMENTS MECANQUES DE SURFACE DE TYPE RAYURE (GALETAGE, SUPERFINITION) G. KERMOUCHE (EMSE)



L'objectif du travail objet de la communication est d'étudier le lien entre les contraintes résiduelles et les procédés de traitement mécanique des surfaces reposant sur des sollicitations de type rayure (galetage, superfinition, polissage, ...). Est présentée tout d'abord une étude numérique qui a permis de dégager des tendances fortes sur la relation entre rayure et contraintes résiduelles.

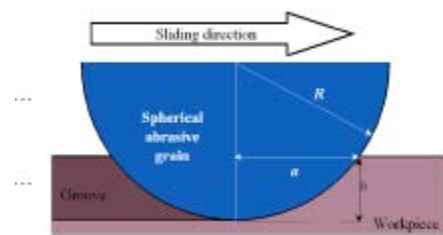


Figure 2.1 Critère a/R

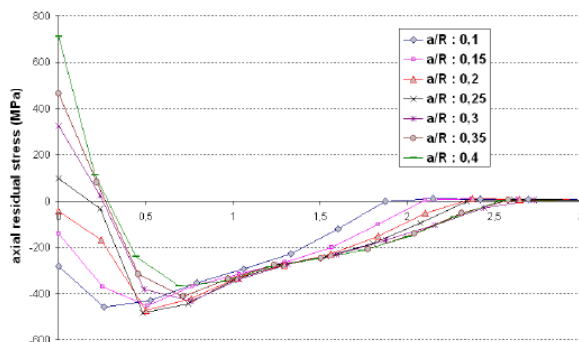


Figure 2.2 Influence du critère a/R

Sont examinées les influences sur les profils de contraintes induites : du critère a/R (Cf. fig.2.1 et 2.2), du coefficient de frottement (fig. 2.3) de la dureté initiale (fig.2.4) et de l'état de contrainte initial (fig.2.5)

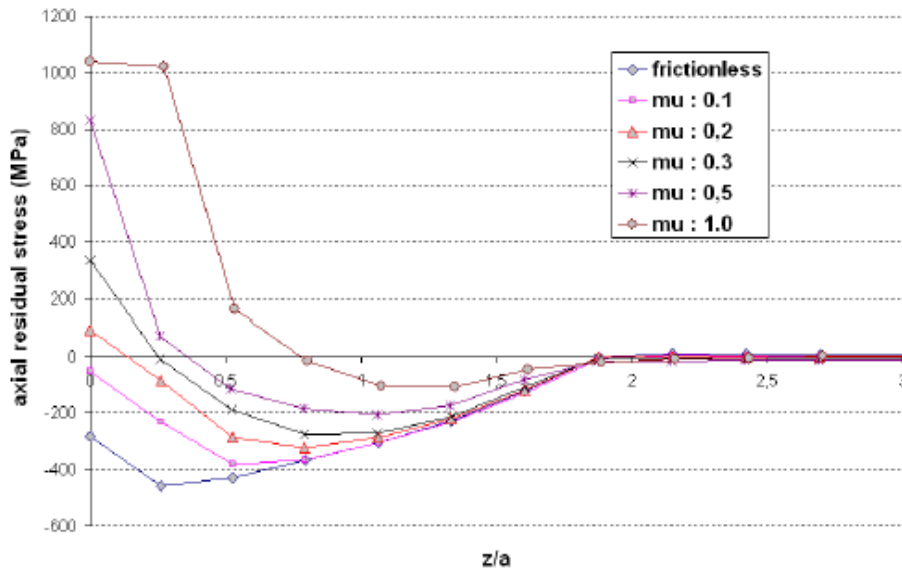


Figure 2.3 Influence du coefficient de frottement

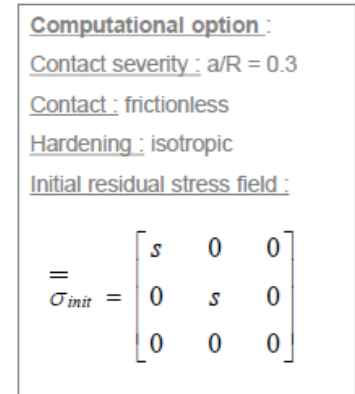
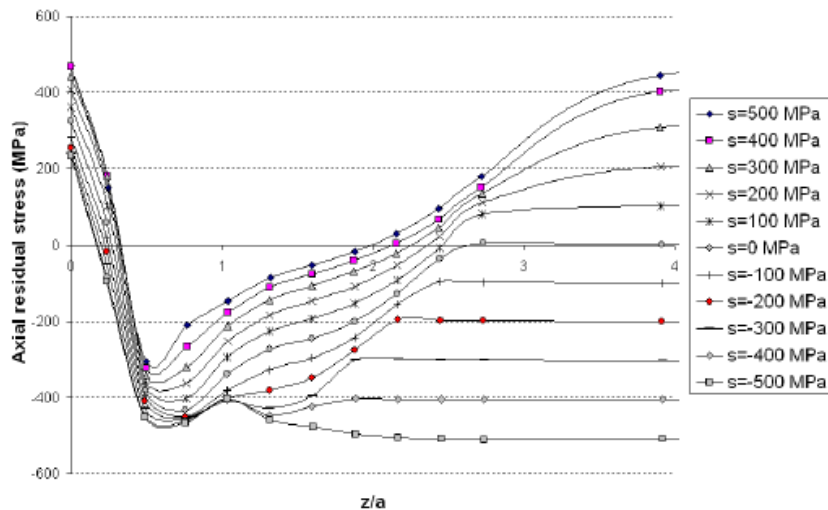
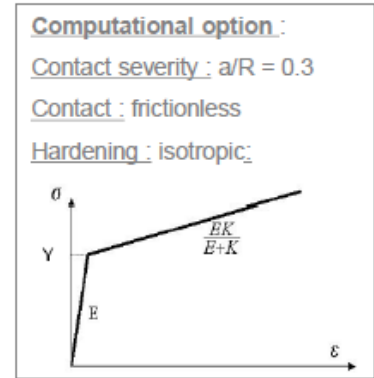
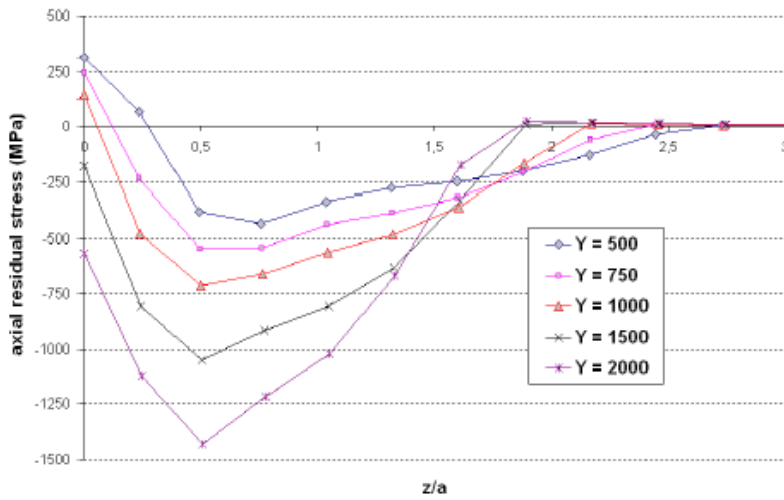


Figure 2.5 influence de l'état de contrainte initial

Figure 2.4 Influence de la dureté

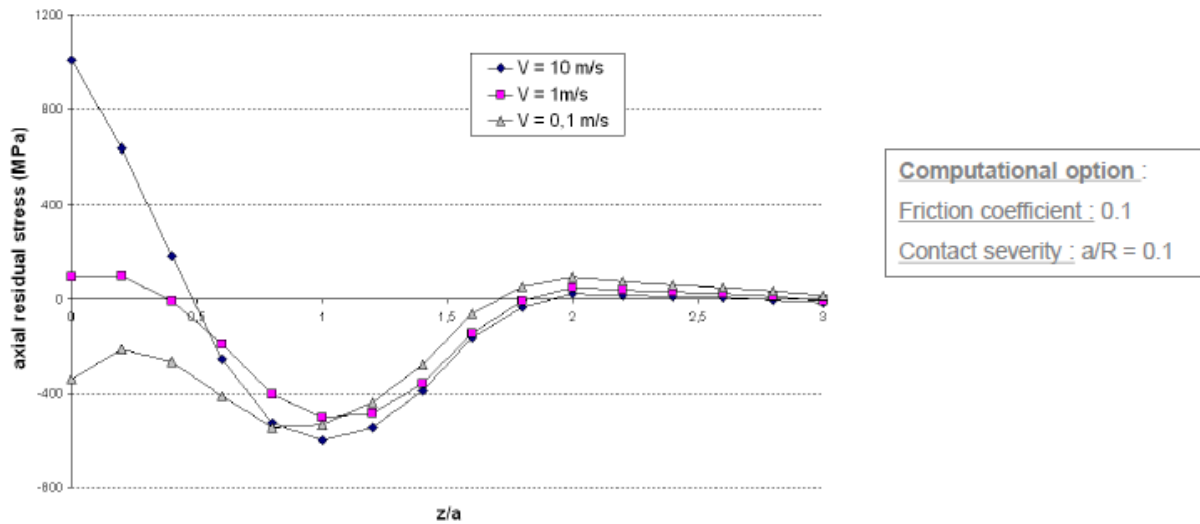


Figure 2.6 Influence de la vitesse de glissement

Ces résultats sont ensuite appliqués pour interpréter les conséquences induites en termes de contraintes résiduelles par différents procédés. Notamment, on observe que - le paramètre prépondérant dans le procédé de galetage est la force appliquée ; l'avance et la vitesse n'ayant un effet que dans des cas très particuliers - le toilage induit des contraintes de compression en extrême surface d'autant plus fortes que la taille des grains abrasifs et la force appliquée par le galet sont importants - le polissage par flux d'abrasifs peut aussi induire des compressions résiduelles selon le niveau de pression dans le fluide. Ces résultats sont en excellent accord avec l'approche locale développée dans la première partie du papier. L'étude conclut sur l'intérêt des travaux présentés pour optimiser ces différents procédés, dont certains sont originellement développés pour diminuer la rugosité, afin d'obtenir des compressions résiduelles en extrême surface. Ces procédés deviennent ainsi des procédés de traitements mécaniques des surfaces au même titre que le procédé de grenailage.

Application to roller burnishing of 15-5-PH

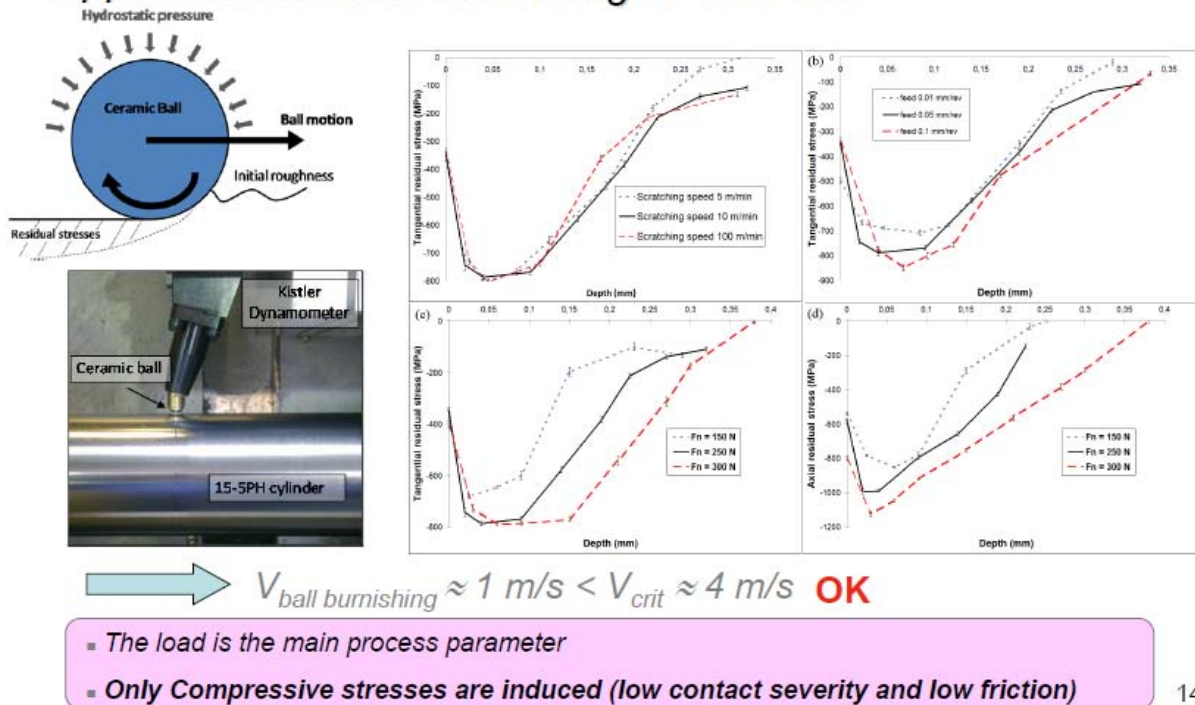


Figure 2.7 Application au galetage d'un acier 15-5-PH

3. GRENAILLAGE DES PIÈCES INITIALEMENT CEMENTÉES ET CARBONITRÉES R. KUBLER (ENSAM)

Une étude du grenailage de précontrainte est présentée. Ce traitement mécanique des surfaces destiné à améliorer la durée de vie en fatigue des composants consiste en l'impact de grenailles sur un massif à une certaine énergie cinétique. Le taux de recouvrement représente le ratio entre la surface impactée sur la surface à impacter. Par la simulation éléments finis, il est proposé de déterminer les champs de contraintes résiduelles et les modifications de géométrie après impact sur un massif semi-infini. En partant de simulations d'impact calibrées sur des essais d'impact d'une bille sur un massif, on étudie le grenailage d'une surface traitée thermo-chimiquement. Les simulations par Éléments Finis consistent en l'impact monobille (fig. 3.1) ou multibilles de sphères sur un massif déformable.

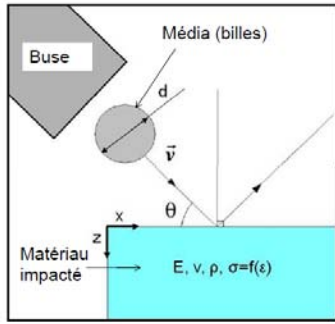


Figure 3.1 Mono impact

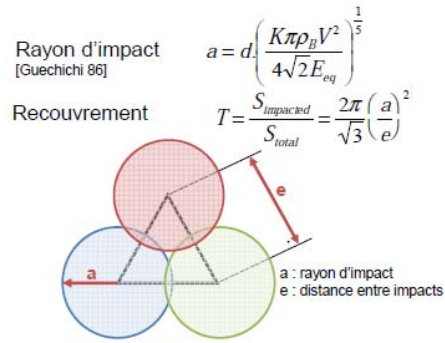


Figure 3.2 Impact multibilles

Différents cas d'étude sont proposés sur différents matériaux (316L, Inconel,...). Les paramètres numériques (contact, éléments) et physiques (frottement, angle, taux de recouvrement,...) sont analysés pour étudier leur influence sur le changement de géométrie de la pièce impactée et les champs mécaniques générés. Un canon d'impact a été développé (fig.3.2) et instrumenté pour réaliser des essais mono-impact. Pour le cas d'impact monobille, on étudie expérimentalement et par simulation le taux de restitution de la bille après impact ($e=V_r/V_a$).

Canon d'impact à air comprimé

- Bille Si_3N_4 Φ 10.3 mm, $\rho=3170 \text{ kg/m}^3$, $E=280 \text{ GPa}$, $\nu=0.26$
- Massif Inco600, AISI 316L
- Impact à vitesse V_A (mesure caméra et barrières)
- Angles d'impact 90° et 60°
- Topographie obtenue par mesure sur rugosimètre:
 - Profondeur et rayon d'impact
- Mesure de la vitesse de rebond V_R
- Coefficient de restitution

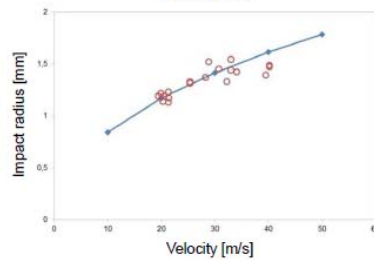
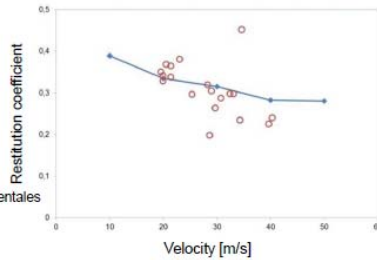
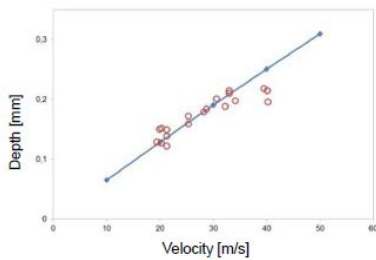
$$e = \frac{V_R}{V_A}$$



Figure 3.2 Canon d'impact

- Inconel 600
- Taux de restitution, profondeur d'impact, rayon d'impact fonction de la vitesse d'impact
- Divergence à haute vitesse (loi élastoviscoplastique)

○ Données expérimentales
— Simulations EF



- Inox AISI 316L
- Taux de restitution, profondeur d'impact, rayon d'impact fonction de la vitesse d'impact
- Divergence à haute vitesse (loi élastoviscoplastique)

○ Données expérimentales
— Simulations EF

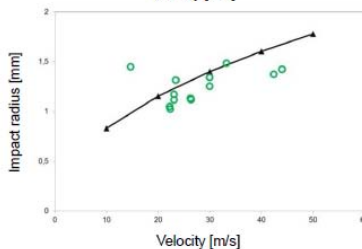
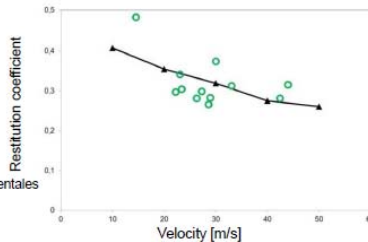
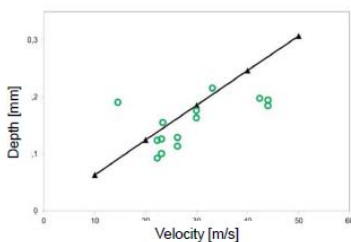


Figure 3.3 Etudes des paramètres sur Inconel et 316L

Ces simulations numériques de grenailage sont ensuite appliquées au cas d'un matériau initialement traité thermochimiquement par cémentation ou carbonituration. Les champs mécaniques initiaux (contraintes résiduelles et déformation plastique) sont implémentés à partir des analyses de contraintes par DRX réalisées sur le matériau traité. Des simulations d'impact multibilles permettent de se rapprocher d'un cas élémentaire de grenailage industriel. Des confrontations expérience/simulation sur du grenailage industriel sur des pièces (fig.3.4) ayant subi un traitement thermochimique initial (fig. 3.5) sont présentées en confrontant les profils de contraintes résiduelles (fig. 3.6), le grenailage augmente significativement le taux de contrainte et les résultats de la simulation sont en bon accord avec les mesures sur pièce réelle.

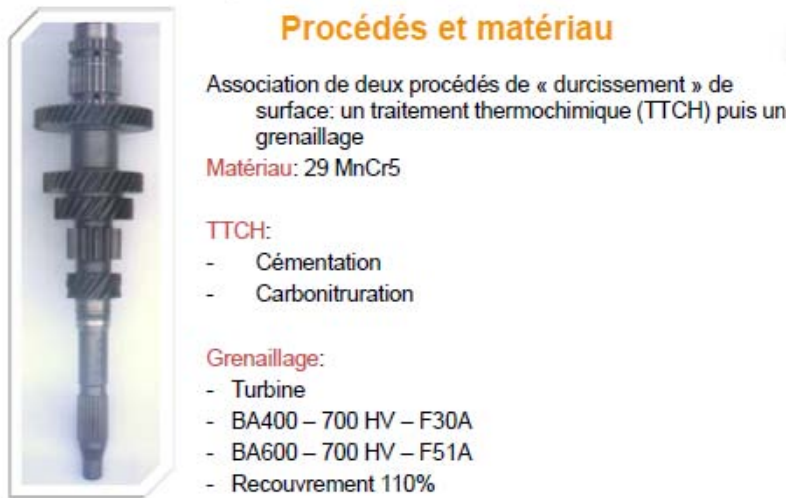


Figure 3.4 Pièce étudiée

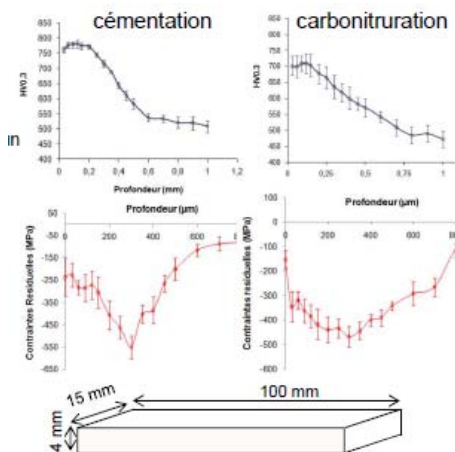
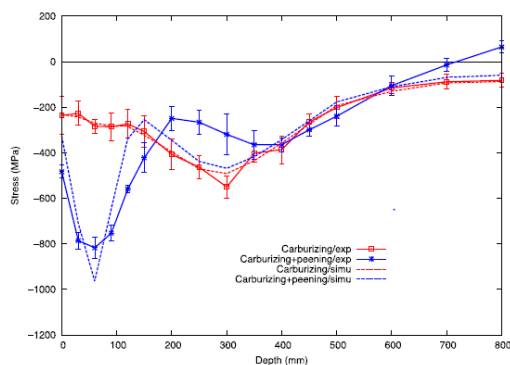


Figure 3.5 Etat avant grenailage, filiation de dureté et contraintes induites. Jauge Almen utilisée.

Cémentation + grenailage BA600 (exp + simulation)



Carbonituration + grenailage BA600 (exp + simulation)

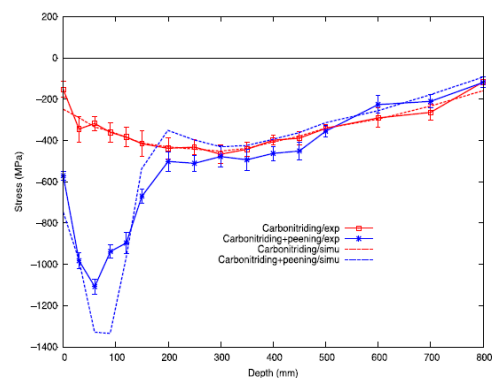


Figure 3.6 Simulation et mesure sur état cémenté et carbonitridé

4. MODELISATION COMPLETE DU GRENAILLAGE PAR ULTRASON : DE LA DYNAMIQUE DES BILLES A LA DEFORMEE DE LA PIECE EN PASSANT PAR LE PROFIL DE CONTRAINTES RESIDUELLES E. ROUHAUD (JTT)

Le Grenailage est un procédé de traitement mécanique de surface, qui consiste à bombarder la surface du matériau avec des billes projetées à différentes vitesses. L'impact provoque une déformation plastique et donc

des contraintes résiduelles de compression en surface. L'objectif de cette étude est l'amélioration de la maîtrise du procédé de grenaillage et de prévoir la distribution de contraintes résiduelles après grenaillage.

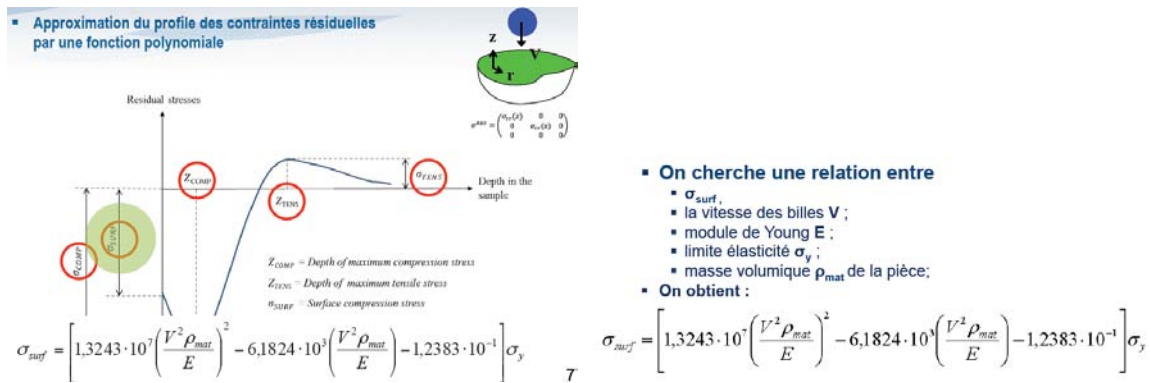


Figure 4.1 La vitesse d'impact est en relation avec le diamètre des billes (les ordres de grandeur courants sont de l'ordre de 5m/s. La prévision des contraintes résiduelles en surface, par éléments finis, est faite par une approche analytique à partir d'un polynôme d'ordre 4 établissant une relation entre σ_{surf} , r des billes, E et σ_y , ρ du matériau grenaillé.

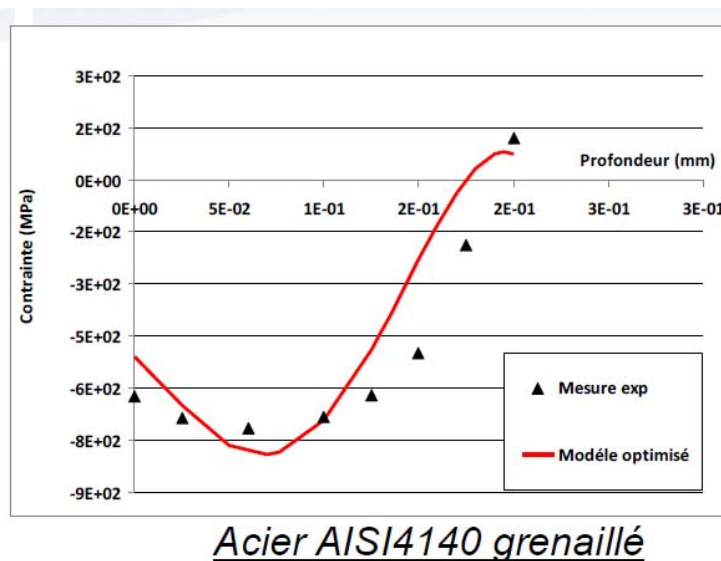


Figure 4.2

Une comparaison entre les profils de contrainte modélisés et des profils expérimentaux est proposée afin de tester leur fiabilité. Pour simuler le grenaillage sur des pièces complexes le profil de contrainte est calculé avec le modèle, il est ensuite introduit dans un modèle éléments finis de la pièce complexe qui fournira, après calcul, l'état de contraintes et déformations sur toute la pièce. La possibilité d'utiliser un modèle dynamique des billes qui permet de simuler le grenaillage ultrason (GUS) et de fournir la distribution des vitesses d'impact permet l'utilisation de ce modèle pour le GUS.

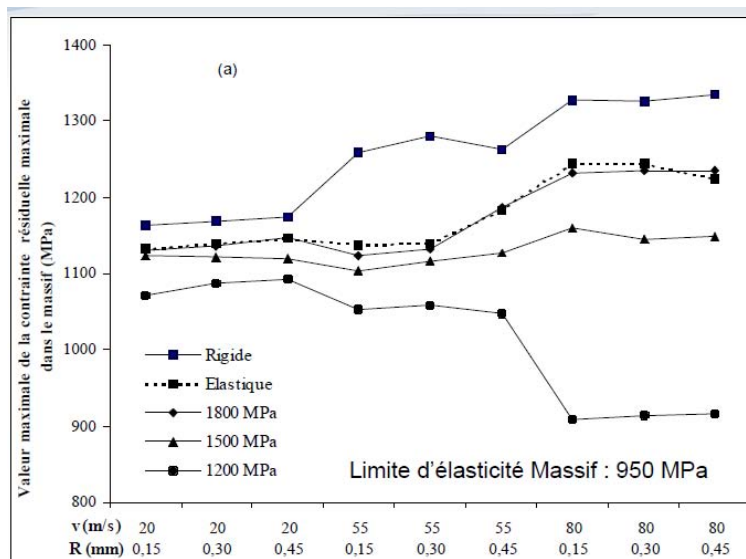


Figure 4.3 Influence des caractéristiques mécaniques de la grenaille

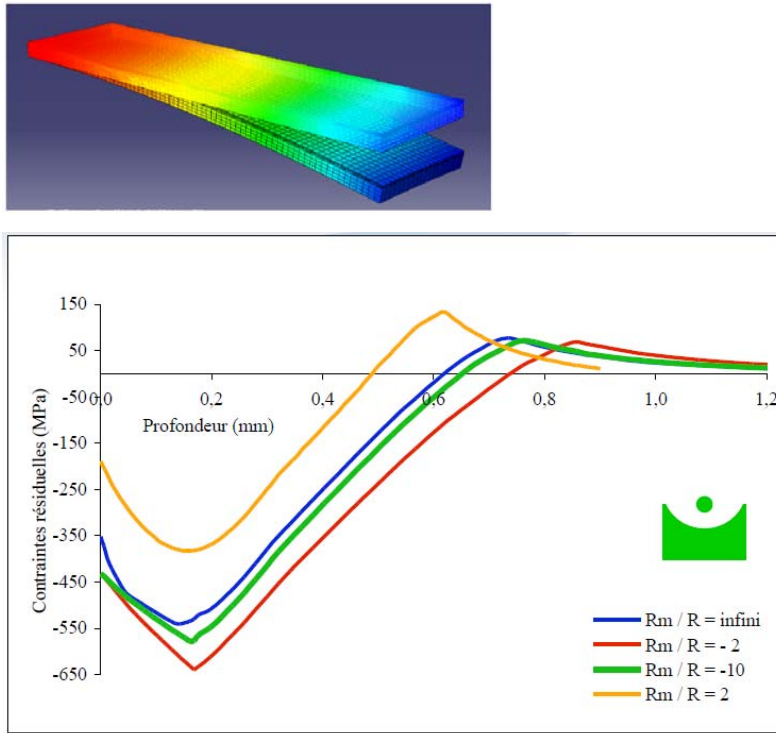


Figure 4.4 Influence du rayon de courbure

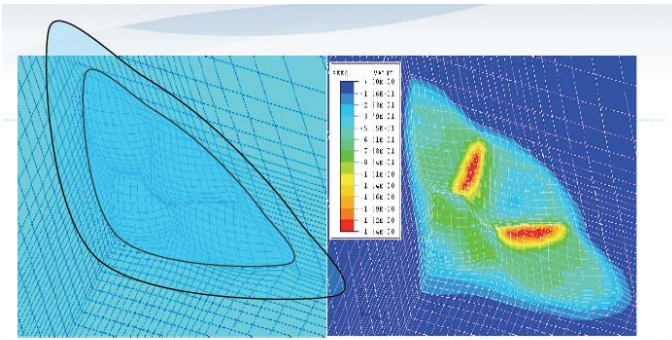


Figure 4.5 Modélisation multi-impact

La prise en compte du profil de contrainte résiduelle dans le dimensionnement d'une pièce est extrêmement importante. L'avantage du modèle proposé est sa rapidité d'exécution, et la simplicité du passage entre les profils de contrainte modélisés à la pièce déformée à l'aide d'un code FEM et avec un calcul de rééquilibrage statique. Les futurs développements concernent les méthodes d'introduction des contraintes afin d'effectuer des calculs sur des pièces à géométrie de plus en plus complexes tels que des ressorts et aubes.

5. MODELING THE EFFECT OF ULTRASONIC SHOT PEENING IMPACTS ON RESIDUAL STRESS AND MATERIAL BEHAVIOR P. GILLES, V. ROBIN (AREVA), T. CHAISE, D. NELIAS (INSA-Lyon)

Les procédés de mise en compression des surfaces ont pour objectif de retarder voire empêcher l'amorçage de fissure en fatigue ou en corrosion. A tout le moins il s'agit d'éviter le risque de propagation de fissure. Les techniques sont multiples mais toutes procèdent par création d'un champ de contrainte résiduelle de compression. AREVA a testé plusieurs de ces techniques et a développé la simulation numérique du grenailage. La présentation décrit une méthode de calcul développée par le laboratoire LAMCoS de L'INSA-Lyon et son application au billage d'Inconel 600.

La simulation numérique tridimensionnelle du procédé qui produit de nombreux impacts en des endroits différents, est délicate à réaliser et est coûteuse en temps de calcul. La méthode du LAMCoS réduit nettement la durée de calcul en mettant en œuvre une approche semi-analytique fondée sur le calcul d'un tenseur de déformation plastique moyen dans un espace semi-infini soumis à impacts multiples. Ce champ est ensuite projeté autant de fois que nécessaire sur la structure étudiée. Cette méthode a été validée par benchmark avec des codes de calcul aux éléments finis. Elle a été appliquée au calcul de distorsions et de contraintes résiduelles sur une plaque mince proche de celle des essais Almen. Les comparaisons aux mesures effectuées sont présentées. Enfin une relation entre énergie d'impact et indentation est établie pour prédire la rugosité de la surface impactée, rugosité susceptible de contribuer à l'endommagement en fatigue.

(Contenu de la présentation non communiqué)

6. MESURES DE CONTRAINTES RESIDUELLES T. BERGEY (SNECMA – Groupe SAFRAN)

Safran, groupe spécialisé dans la sécurité et l'équipement aéronautique est soumis à une forte compétitivité et donc à une recherche continue d'amélioration de la durée de vie de ces matériels. Dans ce cadre, la qualification et l'optimisation des procédés de mise en compression sont primordiaux car ils engendrent des gains significatifs en termes de durée de vie par la création d'une couche superficielle de contraintes résiduelles en compression. A contrario certaines opérations comme le soudage ou l'usinage peuvent avoir pour effet d'engendrer des contraintes d'extension dont l'effet sera néfaste sur la durée de vie. Par extension SAFRAN est amené à connaître et à maîtriser toute la chaîne de création des contraintes résiduelles au cours de la vie d'une pièce. Il faudrait plutôt parler d'évaluation des contraintes que de mesure.

La démarche mise en place par Safran est d'obtenir une cartographie des contraintes résiduelles selon différentes méthodes (la diffraction de RX étant la plus courante) en partant de la connaissance des propriétés mécaniques intrinsèques des matériaux, en passant par la qualification des procédés, le suivi de productions et pour finir aux examens d'expertise et de retour d'expérience. Différents exemples sont présentés.

Techniques	Destructive ou non	Type de contrainte	Pénétration	Inconvénient	Avantage
Méthode du trou	Oui	Macro	De 20µm à 5mm	-Interprétation des données -Sensibilité limitée	-Rapide simple -Non sensible à la structure
Diffraction RX	Non Oui si profil	Macro Micro	De 5µm à qq mm avec les RX durs	-Échantillon cristallisé. - Sensible à la structure	-Flexible -Très répandue -Technique de référence
Méthodes CND type Ultra son...	Non	Macro	Qq mm à qqcm ³	- Résolution limité. -Pas de profil en fonction de la profondeur	- Très rapide - Portable - Pas chère
Méthodes Magnétique	Non	Macro	Quelques cm ³	- Matériaux ferromagnétique uniquement	-Grandes variété de techniques -Très rapide - Portable.

→ La plus utilisée en nombre de mesures est la DRX.

Les contraintes sont le plus souvent mesurées en surface et à 80 µm de profondeur. L'attention est attirée sur l'instabilité des contraintes résiduelles, tout apport d'énergie (mécanique, thermique ou chimique) produit une relaxation qui peut conduire à des variations dimensionnelles.

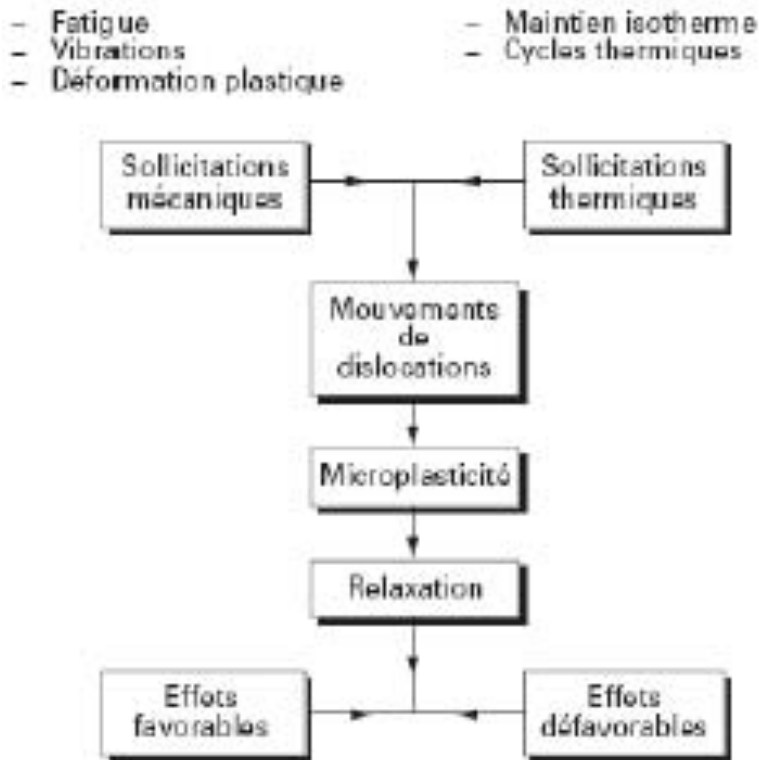


Figure 6.1 Mécanismes d'évolution des contraintes par relaxation

EPROUVETTE EN INCO 718 TOURNEE

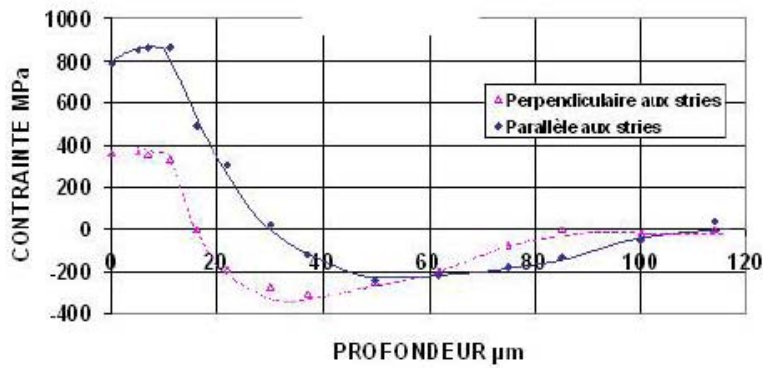


Figure 6.2 Qualification d'un procédé d'usinage

Rouleau M50

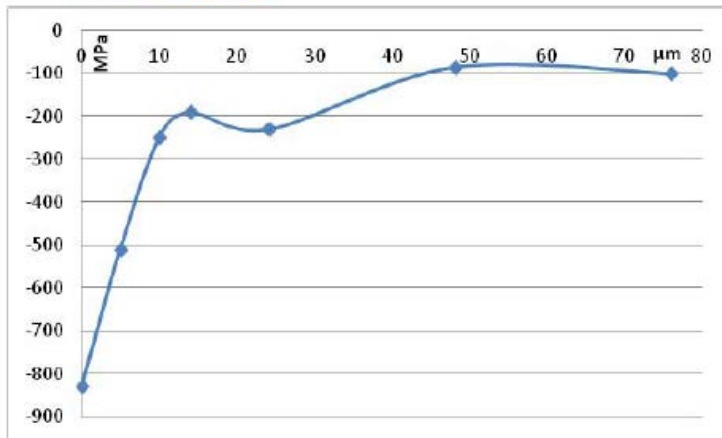


Figure 6.3 Surveillance qualité en production (rouleau de roulement en acier M50, trempé et revenu sur lequel on a pu mesurer une contrainte allant jusqu'à - 800MPa)

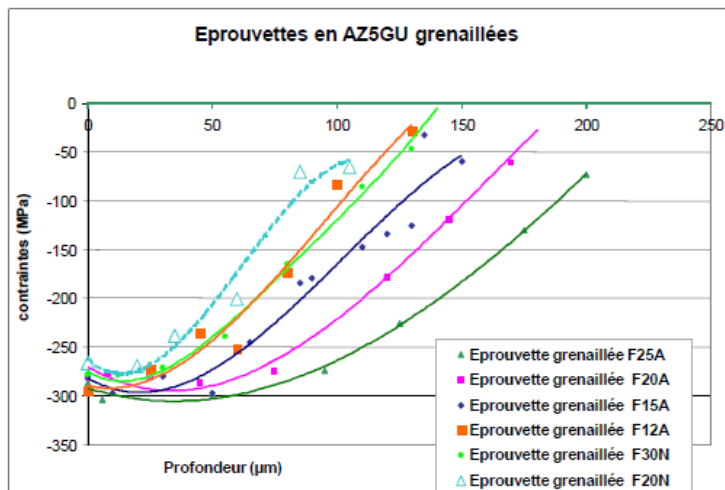


Figure 6.4 Qualification d'un procédé de grenaillage sur AZ5GU

	Contraintes circonférentielles	Contraintes radiales
Disque A	+400MPa	-
Disque B	-70MPa	-20MPa
Disque C	-320MPa	-550MPa

Figure 6.5 Ecart de contraintes résiduelles pour un même matériau, même état de surface, même procédé d'usinage ; source d'écarts de durée de vie. La qualité de l'usinage est en cause

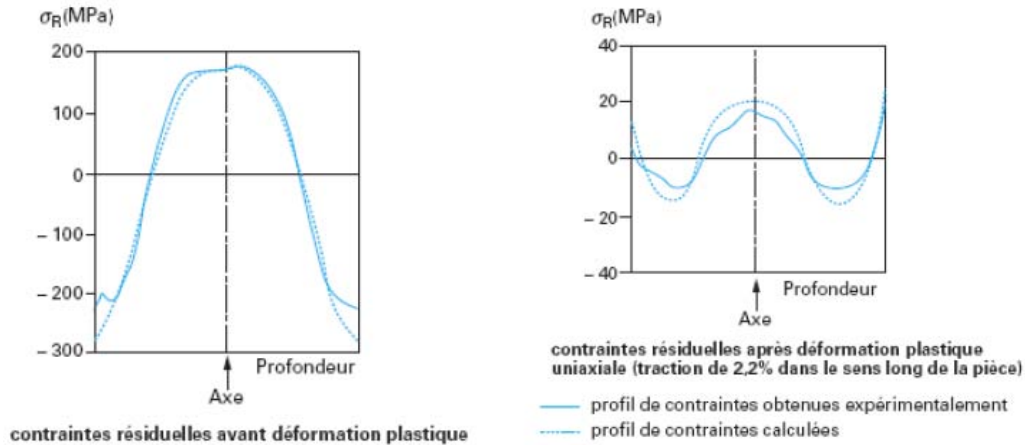


Figure 6.6 Evolution des contraintes résiduelles sur un alliage Al 7075 trempé puis après déformation plastique

7. MAITRISE DU PROCÉDE DE GRENAILLAGE EN USINE (PRESENTATION DU PROCESS DES MACHINES, CONTROLES PAR DRX, DISPERSION DES MESURES) F. LAURENT (PSA)

La réglementation européenne et prochainement internationale est de plus en plus drastique en termes d'émissions de CO₂ des véhicules neufs. Ces exigences conduisent les constructeurs automobiles à diminuer la masse des véhicules en utilisant des organes mécaniques plus légers

Cependant, l'allègement d'une boîte de vitesse par exemple nécessite de rendre celle-ci plus performante pour répondre aux critères de tenue en service, tels que fatigue et écaillage. Chez PSA, des gammes de renforcement par grenailage ont été déterminées pour répondre au plus juste au besoin fonctionnel. Ainsi le niveau de fatigue pied de dent peut passer de 1200 à 1400 MPa.

Le grenailage appliqué en usine doit pouvoir être flexible en fonction du matériau, du traitement thermique et du type de pièces traité, tout en garantissant une qualité et un niveau de contraintes définis.

Ainsi, un suivi rigoureux est réalisé par contrôles DRX aux laboratoires usines, pour s'assurer de la conformité des lots produits. Les procédés de grenailage sont l'objet d'un contrôle rigoureux (intensité Almen à chaque équipe, contrôle de la grenaille en continu, contrôle DRX sur chaque lot pour les pièces critiques). Le seuil mini du niveau de contraintes de compression est toléré. Les contrôles sont réalisés à 3 profondeurs 10 – 30 et 80µm. L'analyse statistique des résultats montre le lien fort entre la microstructure du matériau et le niveau de contraintes résiduelles introduit par grenailage. Ces résultats seront une base pour modéliser le grenailage en fonction de la métallurgie et estimer la durée de vie des pièces.

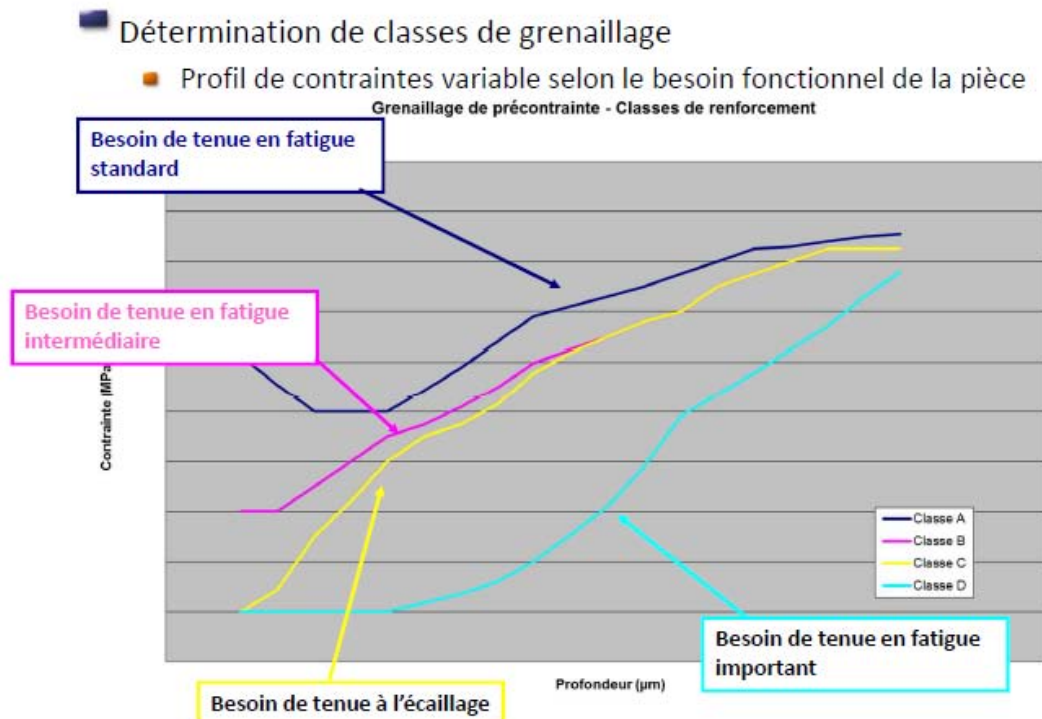


Figure 7.1 Classes de grenailage

La qualification des procédés est réalisée sur un disque cylindrique traité dans les conditions des pièces ; les mesures sont effectuées aux 4 points cardinaux de ce disque. (fig. 7.2)



Configuration
27MnCr5 JV
Cémentation basse pression
27MnCr5 JV
Carbonituration trempé huile

Figure 7.2 Eprovette de qualification des procédés de traitement thermique

Grenaillage de précontrainte - Classe C - Conformité et seuil de surveillance

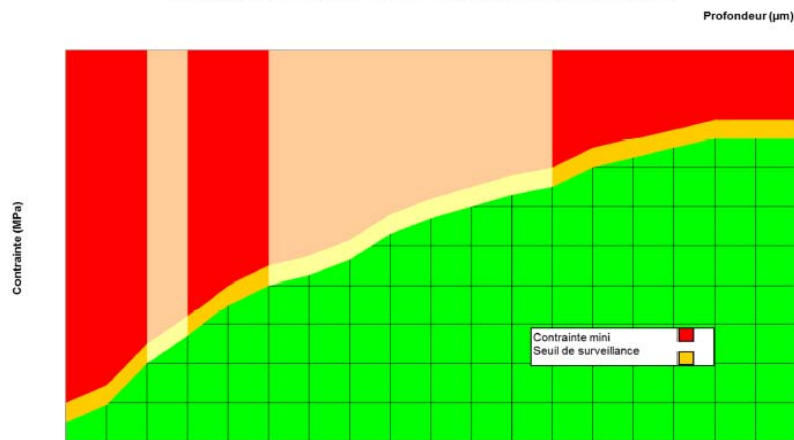


Figure 7.3 Seuil de tolérance des contraintes

■ Différences entre les 4 points cardinaux

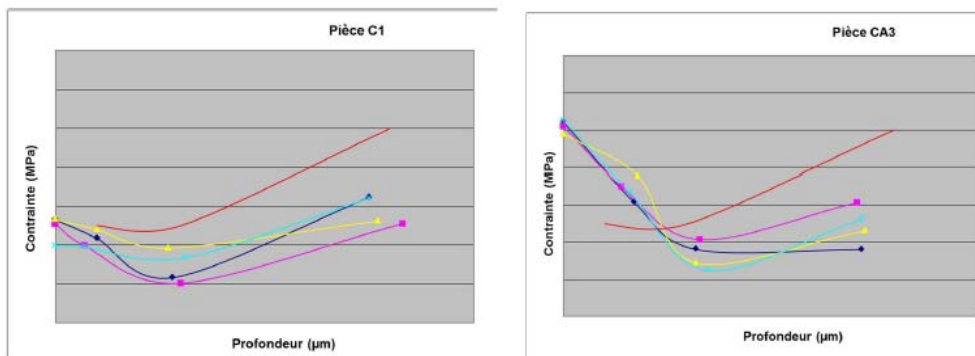


Figure 7.4 Exemples d'écarts relevés sur des disques témoins selon l'origine des traitements

Variation de microstructure aux 4 points cardinaux

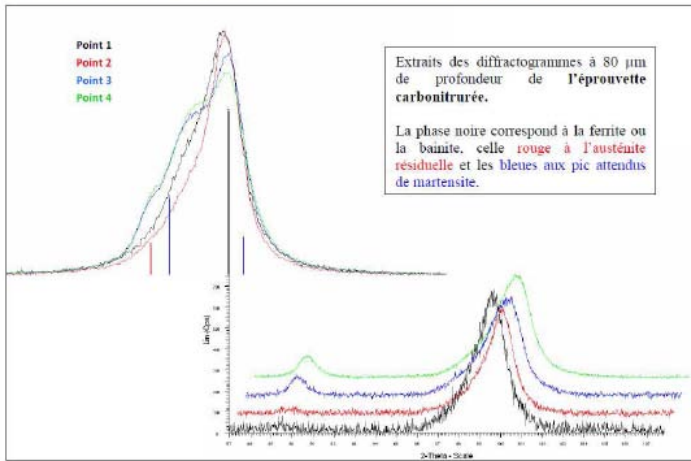


Figure 7.5 corrélation avec les écarts de microstructure.

Toutes pièces et traitements confondus



Figure 7.6 Résultats statistiques sur toutes les usines du groupe PSA

8. GRENAILLAGE CERAMIQUE :

APPLICATION ET DEVELOPPEMENT Renaud HANCY (SEPR SAINT-GOBAIN)

Les billes céramiques sont utilisées dans de nombreuses applications de grenailage de précontrainte dans l'industrie aéronautique sur pièces de moteur et structurales. Elles sont aussi utilisées pour des opérations de formage et de redressage de pièces en titane et aluminium.

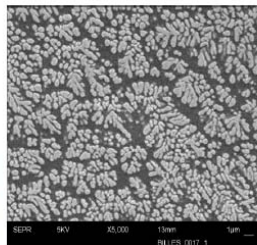
Les billes Zirshot® sont un standard de l'industrie dans ce domaine. Elles se projettent par tous types de procédés en limitant la génération de poussière abrasive. Elles induisent des contraintes de compression significatives sans contaminer les surfaces et tout en préservant leurs structures.

Billes céramiques Zirshot®



- DENSITE 3,8 (apparente 2,3 kg/l)
- DURETE 700 HV (60 HRC, 7 Mohs)
- ASPECT Sphérique et lisse

- MICROSTRUCTURE cristallites ZrO_2 ~67% + matrice vitreuse $SiO_2+Al_2O_3$ ~33%
- Pas de silice libre*



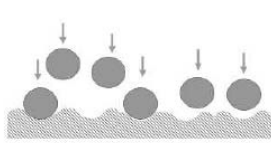
Zirshot® Z100 Z150 Z210 Z300 Z425 Z600 Z850

- Contrôle de tranches granulométriques serrées et de forme
- Conformité aux normes aéronautiques AMS 2431/7, NF-L 06-831

Figure 8.1 Présentation des billes céramiques Zirshot®

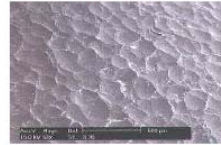
L'émergence de nouvelles demandes dans les finitions de surface a orienté Saint-Gobain Zirpro à développer les gammes de billes fines telles que les Microblast®. Ces billes permettent notamment des texturations douces et esthétiques mais induisent également des contraintes résiduelles qui contribuent à augmenter la tenue en fatigue et la résistance à la corrosion des pièces traitées. Leur application est compatible avec la plupart des traitements de surface notamment électrolytiques.

■ Fort transfert d'énergie (dureté, élasticité, réfractarité)



Grenailage régulier et non abrasif

Aluminium



■ Stabilité du media en taille, forme, surface et dureté



■ Poussière minimisée, pas de contamination, ni de corrosion, compatible avec les traitements électrolytiques et par dépôts.

Figure 8.2 Propriétés du grenailage céramique

Zirshot® sur Alliages d'Aluminium 2214T6*

Limite d'endurance +30%

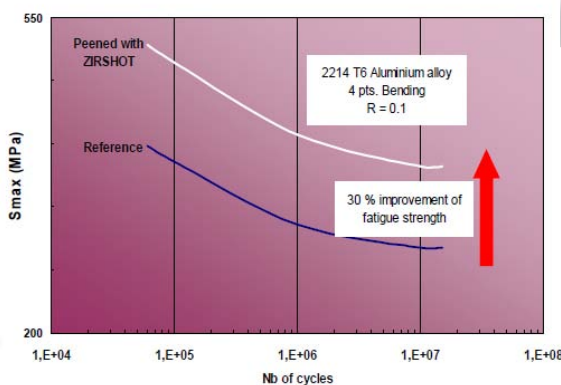


Figure 8.3 Gain apporté par le grenailage céramique sur disque de frein

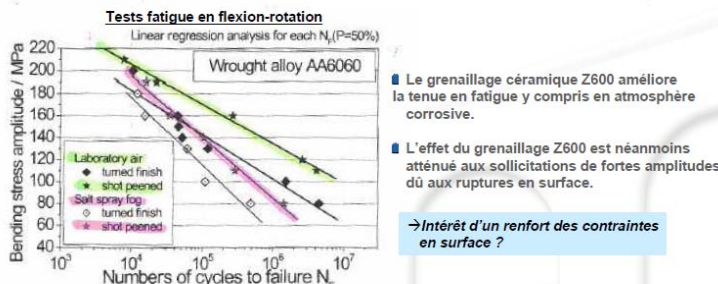
Fatigue corrosion



Effet de grenailage céramique sur Aluminium forgé AA 6060 *

Eprouvettes cylindriques tournées & grenillées Zirshot Z600 @ 0,2mmA / 200%

Condition	RUGOSITE		CONTRAINTES	
	Ra(µm)	Rz(µm)	Moyenne (MPa)	Plage (MPa)
Turned finish	0,30 µm	2,18µm	- 44 MPa	+ - 61 MPa
Shot peened	5,09µm	30,34µm	- 116 MPa	+22 MPa



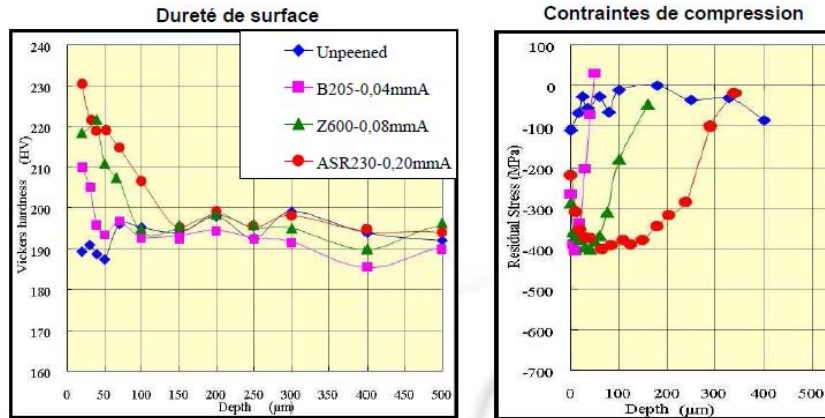
* Ref. K. Timmermann, W. Zinn, B. Scholtes, University of Kassel – ICSP 11th



Figure 8.4 Effet du grenailage sur la fatigue corrosion de l'alliage Al 6060 forgé

Billes fines en précontrainte

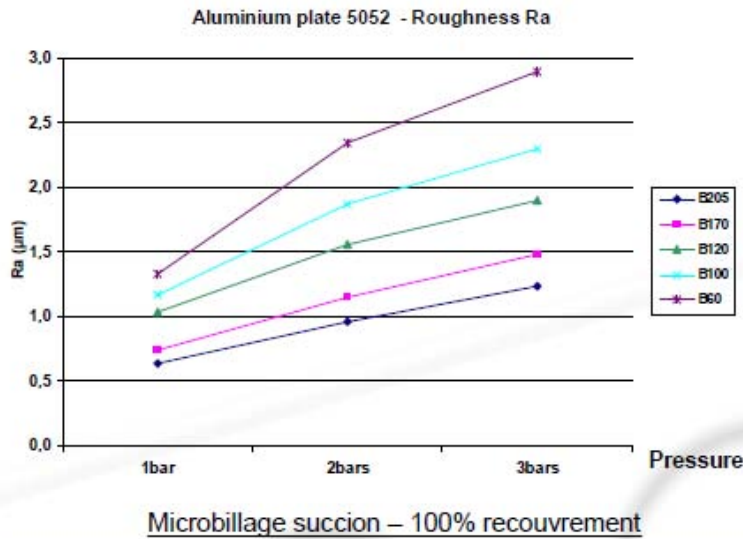
Aluminium forgé A7075-T651



→ Le microbillage aux billes céramiques fines (ex. B205) doit améliorer la tenue en fatigue lors de ruptures en surface du matériau.

Courtesy of Sintokogyo (Japan)

Figure 8.5 Effet du grenailage sur l'alliage Al 7075



Microbillage suction – 100% recouvrement



Figure 8.6 Utilisation comme finition de surface

9. DEUX PROCÉDES DE MISE EN COMPRESSION : SHOT PEENING & LASER PEENING S. LERAY (MIC)

Les contraintes résiduelles sont déterminantes pour la tenue en fatigue d'une pièce, surtout en fatigue polycyclique.

Le Shot Peening & le Laser Peening sont deux procédés d'introduction de contraintes résiduelles de compression applicables à tous les matériaux métalliques.

Le Shot Peening est un procédé mécanique d'écroutissage à froid par projection de médias (billes d'acier, inox, verre ou céramique ou fil coupé rodé).

Il permet d'introduire des contraintes résiduelles de compression et de modifier l'état de surface de la pièce. Il traite les problèmes de fatigue, de fatigue de contact, de fretting, de corrosion sous contrainte, de corrosion intergranulaire, de fatigue thermique, ainsi que les joints soudés et permet des opérations de Formage et de redressage.

Les gains en limite d'endurance sont de +10% à +40% suivant le matériau, les sollicitations, l'environnement et les paramètres de grenailage.

Le Laser Peening est utilisé en production série depuis plus de 10 ans.

Il utilise un laser verre néodyme qui induit des puissances de 2 à 10 GW/cm² sur les pièces traitées.

Le plasma créé par le laser à la surface de la pièce provoque une onde de choc quasi-plane qui génère des contraintes de compression très profondes : jusqu'à 10 mm.

Cette technologie permet de traiter des pièces déjà fissurées ou d'augmenter significativement la durée de vie. Le Laser Peening érode très peu et a très peu d'influence sur l'état de surface original.

Les gains du Shot Peening et du Laser Peening sont caractérisés par des essais comparatifs de fatigue mais un cahier des charges peut également comporter des profils de contraintes résiduelles à atteindre.

Après la présentation et la comparaison de ces deux procédés, des exemples d'applications industrielles sont présentés...

(Contenu de la présentation non communiqué)

10. LE GRENAILLAGE ULTRASON : DE LA SIMULATION A LA SOLUTION DE PRODUCTION J. BADREDDINE (SONATS)

SONATS, filiale du groupe Europe Technologies, est une société spécialisée dans les traitements mécaniques de surfaces avec comme technologie principale le grenailage de précontrainte par ultrasons ou « ultrasonic shot peening » (Technologie Stressonic®). Cette technologie, introduite en France dans les années 90s, a depuis fait ses preuves dans les secteurs de l'aéronautique, le nucléaire, l'industrie lourde, le naval et l'automobile.

SONATS a entrepris des travaux de R&D afin de permettre de répondre le plus efficacement aux exigences (coûts et cadences de production, normes...) croissantes de ses clients et du marché. Un de ses outils, développé dans le cadre de la thèse CIFRE n° 514/2011, (fig.9.1) se focalise sur le procédé-même de grenailage ultrason (dynamique des billes) en conditions industrielles. L'outil permet de modéliser les trajectoires de billes et de répertorier l'ensemble des impacts (coordonnées spatiales, vitesses, angles, recouvrement) qui ont lieu pendant un temps de traitement donné.

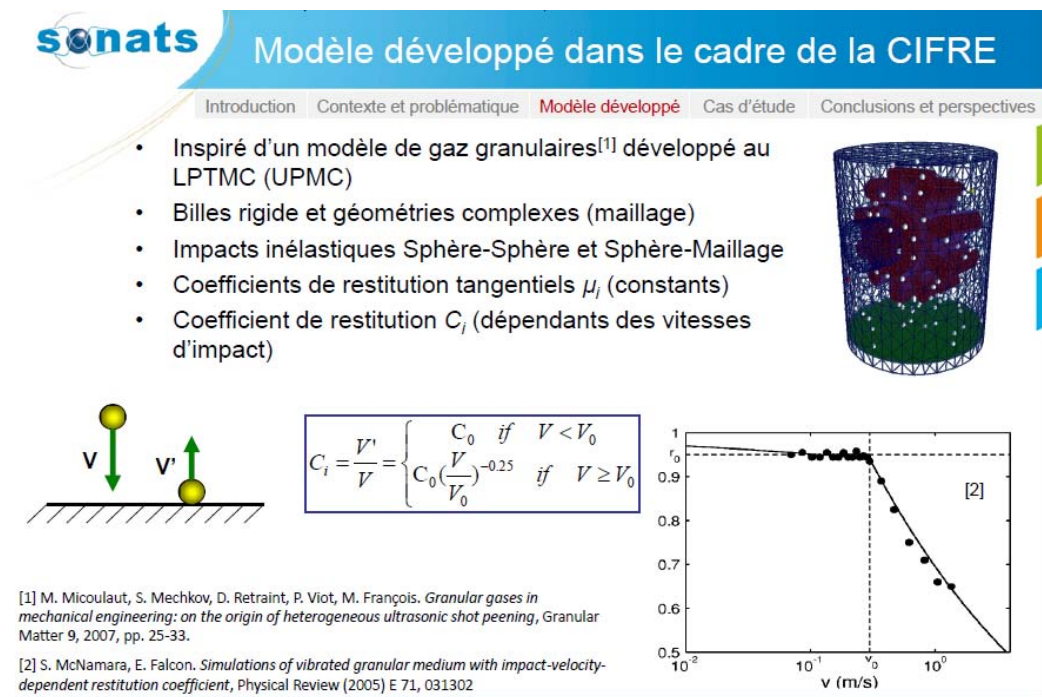


Figure 10.1

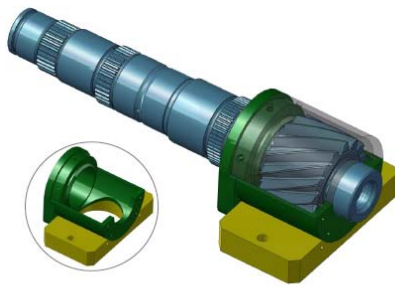
Lors de la présentation, le procédé de grenailage ultrason est présenté, suivi du contexte industriel actuel, de la problématique et vers ce dont SONATS souhaite tendre dans un avenir proche. Puis, l'outil de simulation développé est présenté. Ensuite, un cas d'étude industriel traite du traitement d'un arbre cannelé de boîte de vitesses automobile (fig. 9.2) ; depuis le cahier des charges du client jusqu'à la solution de production finale. Ce cas d'étude permet ainsi d'illustrer l'utilité de l'outil développé, ainsi que sa place au sein du processus de mise au point du procédé de grenailage ultrason et de conception de la solution globale de production (cf. figures 10.3 ci-dessous).

- Arbre cannelé de boîte de vitesses automobile
- CdC**
- Plusieurs variantes du pignon
 - Dentures à traiter
 - Homogénéité du traitement
 - Un maximum de contraintes résiduelles
 - Une faible rugosité
 - Cadence de production

Figure 10.2

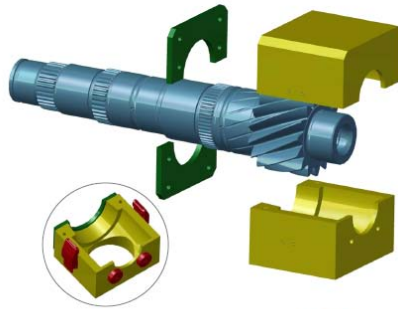
Enceinte 1 : spécifique

→ Une enceinte par variante



Enceinte 2 : générique

→ Une enceinte pour toutes les variantes



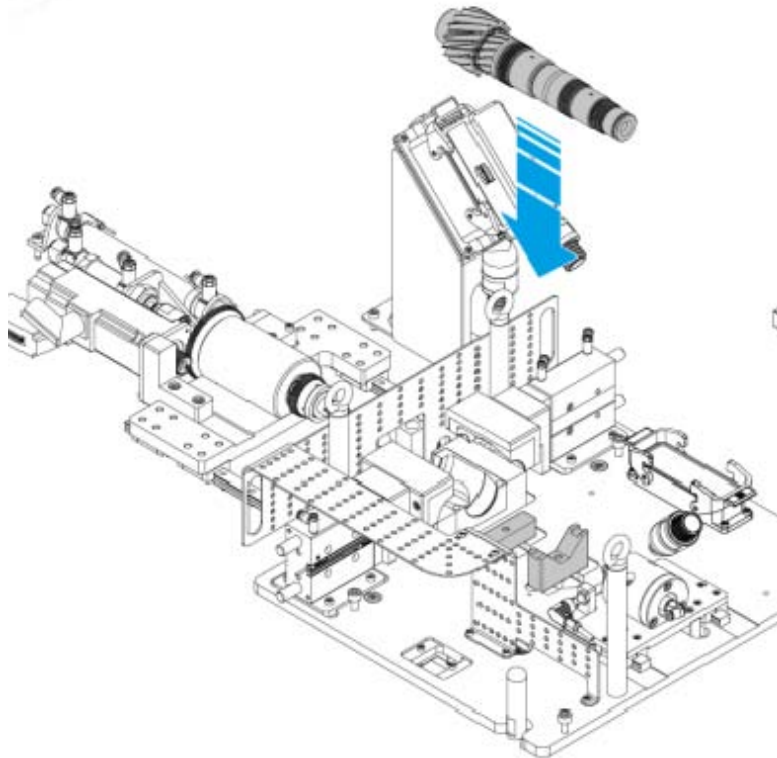
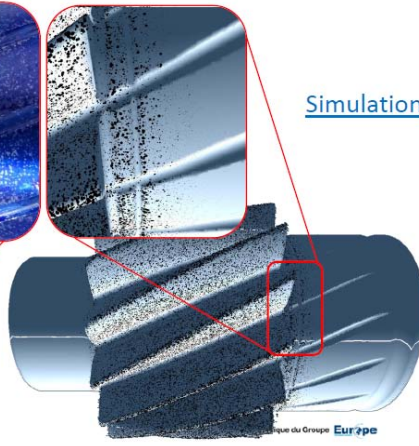
SONATS • Département Technologique du Groupe **Eurype**

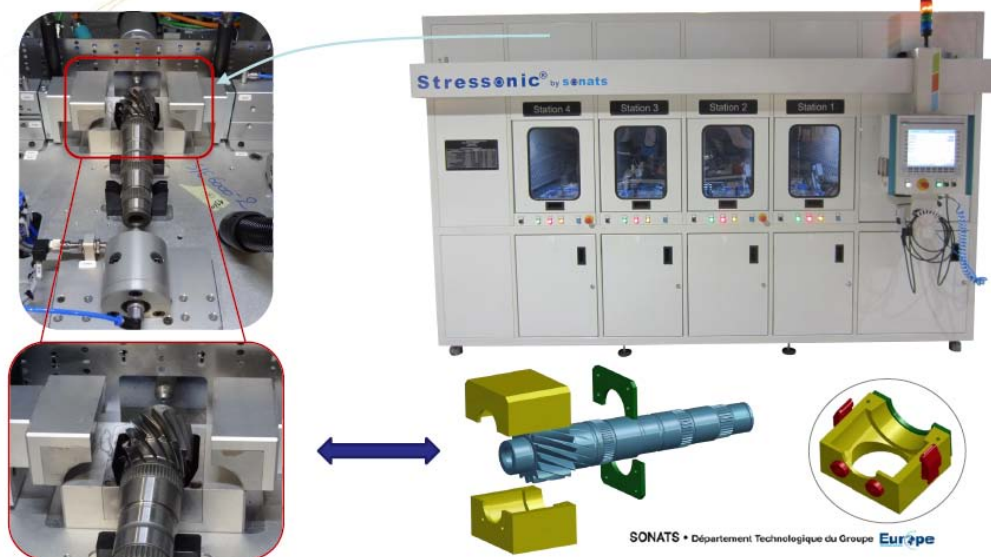
Recouvrement

Expérience



Simulation





Figures 10.3

11. QU'EST CE QU'UNE GRENAILLE DE QUALITE POUR LE SHOT PEENING

T. PREZEAU (WINOA)

Parmi les différentes applications de la grenaille d'acier coulée (nettoyage, ébavurage, préparation surface...), le grenailage de précontrainte est l'opération qui requiert le plus de précautions dans sa mise en œuvre et donc la plus exigeante au niveau de la qualité intrinsèque de la grenaille utilisée.

Le choix du média ayant un impact important sur la qualité, la reproductibilité et le coût du traitement, il constitue donc un facteur clé de réussite de l'opération de grenailage de précontrainte. Paradoxalement, le procédé de production des grenailles et les enjeux qualité qui en découlent sont peu ou mal connus des utilisateurs finaux, ce qui ne facilite pas le choix du produit le plus performant.

Au cours de cette présentation, sont décrites les étapes de fabrication de la grenaille d'acier (fig. 10.1) et, pour chacune de ces étapes, sont soulignés les enjeux qualité qui en découlent et les conséquences sur la mise en œuvre du grenailage de précontrainte, notamment à travers les exigences des principales normes. L'effet du choix de la dureté de la grenaille est présenté.



Synoptique de fabrication

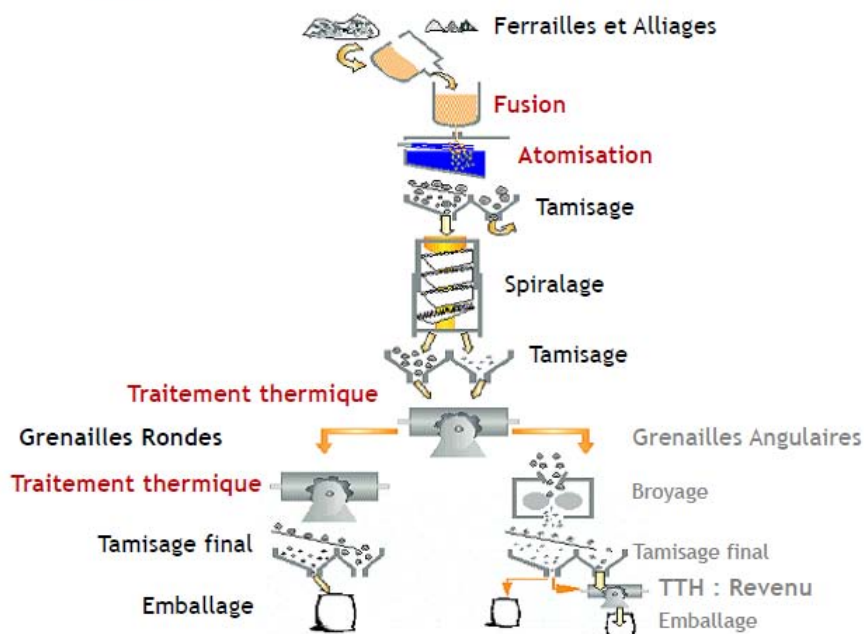
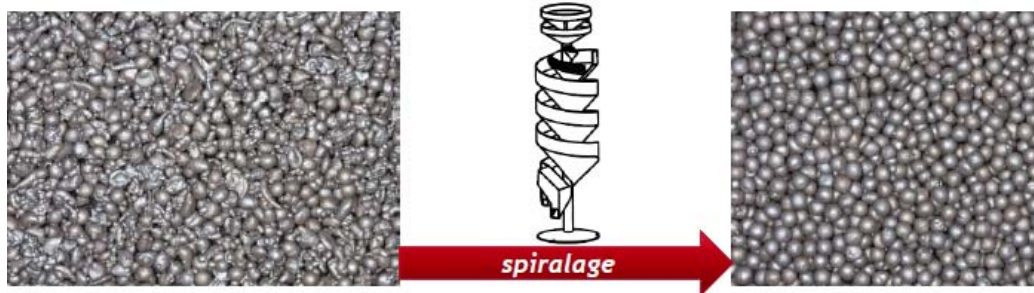


Figure 11.1 Synoptique général de fabrication

- 1^{er} tamisage afin de diriger vers le broyage les billes supérieures à 2 mm
- Spiralage(s) afin de diriger les particules non-sphériques vers la refusion



- 2nd tamisage afin de séparer les billes selon plusieurs classes de taille

Le 2nd tamisage est un facteur clé de qualité permettant d'adapter les conditions de traitement thermique à la taille des billes.

Figure 11.2 Tamisage

1^{er} traitement thermique: austénitisation + trempe

- Homogénéisation de la microstructures des différentes billes
- Affinement de la martensite
- Diminution du taux d'austénite résiduelle

2nd traitement thermique: revenu

- Réglage de la dureté
- Précipitation des carbures (fins et homogènes)
- Détensionnement des contraintes de trempe

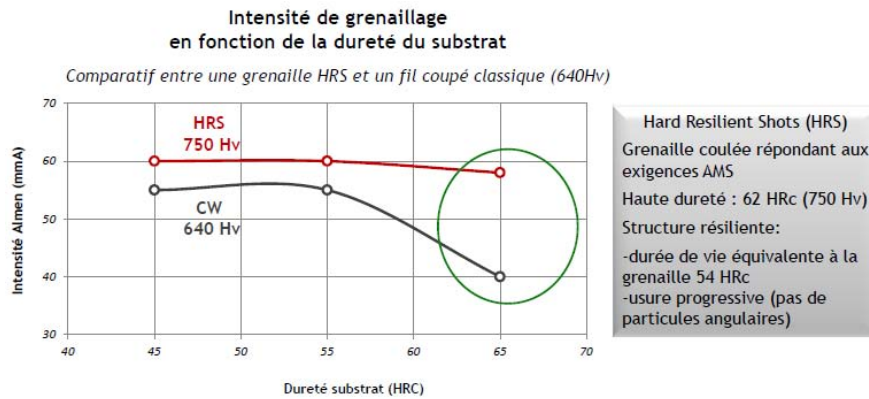
Lors de traitements thermiques il est nécessaire:

- d'adapter les paramètres à la taille des billes traitées,
- de contrôler l'atmosphère afin d'éviter la décarburation

Figure 11.3 Traitement thermique

Propriété	Besoin	Objectif	Etapes du process concernées
Dureté	<ul style="list-style-type: none"> • Dureté grenaille >> dureté substrat • Faible écart-type 	Transférer efficacement l'énergie cinétique au le substrat	Fusion/Atomisation + TTH
Densité	La plus élevée possible	Transporter le plus d'énergie cinétique	Fusion/Atomisation
Forme	Grains sphériques	<ul style="list-style-type: none"> Conservé de l'énergie cinétique après rebond Ne pas endommager la surface de la pièce 	Fusion/Atomisation + Spiralage
Mode d'usure	Pas de casse en particules angulaires	Ne pas endommager la surface de la pièce	Fusion/Atomisation + TTH
Taille	Taille adaptée à la pièce traitée	<ul style="list-style-type: none"> • Atteindre l'intensité visée • Limiter la rugosité • Traiter les zones difficiles • Ne pas déformer la pièces 	Tamisage

Figure 11.4 caractéristiques demandées à une grenaille



Efficacité de grenailage préservée tant que dureté grenaille > dureté substrat
 → Il est nécessaire d'utiliser de la grenaille haute dureté pour traiter efficacement les matériaux à haute résistance mécanique

Figure 11.5 Effet de la dureté

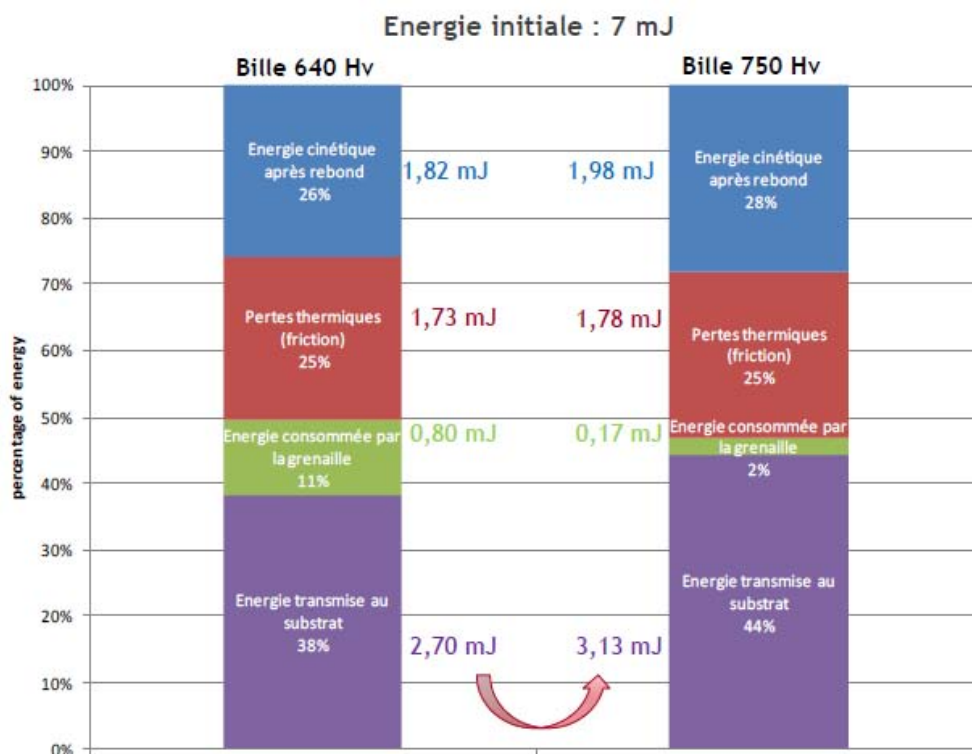


Figure 11.6 Effet de la dureté des billes de diamètre 1mm projetées à 60 m/s, sur l'énergie transmise

Conditions de grenailage

Media	Recouvrement	Intensité Almen	Vitesse de projection	Débit	Pièces grenillées
CW-640HV 0.8 G2	120%	F15C	80 m/s	180 kg/min	 Acier à ressort traité à 2050 MPa
HRS S330	120%	F22C	80 m/s	180 kg/min	
HRS S330	120%	F17C	64 m/s	180 kg/min	

Essais de fatigue sous environnement corrosif (cycle de brouillard salin)

Media	Vitesse	Intensité	Résistance en fatigue à 930 ± 346 MPa (nb de cycles)		
			10% de rupture	50% de rupture	90% de rupture
CW 0.8	80 m/s	F15C	45 000	62 000	78 000
HRS330	64 m/s	F17C	63 000	102 000	108 000

→ **Gain moyen en durée de vie: +47%**

Figure 11.7 Application à des ressorts hélicoïdaux

Paramètre	SAE J827	AMS2431	Remarques
Dureté	Plus de 90% des grains dans la plage visée (spécifiée par l'utilisateur)	Plus de 90% des grains dans la plage visée (45-52 HRC ou 55-62HRC)	Plages de 7 HRc Pas de mention d'écart type
Densité absolue	> 7 g/ml	> 7 g/ml	Densité acier 7.8 g/ml → Quelques porosités acceptées
Composition chimique (hors Mn)	%C : 0,8-1,2 %Si : > 0,4 %S et P < 0,05	%C : 0,8-1,2 %Si : 0,4-1,5 %S et P < 0,05	Normes très proches (AMS indique une valeur max de Si)
Taux de Mn	0,35-1.2% de S70 à S110 0.50-1.2% pour S170 0.6-1.2% à partir de S230	0,35-1.2% de S70 à S130 0.50-1.2% de S170 à S190 0.6-1.2% à partir de S230	Prise en compte de la perte de Mn lors de l'atomisation

Figure 11.8 Exigences normatives communes aux normes SAE / AMS

Paramètre	SAE J827	AMS 2431	Remarques
Microstructure	Martensite revenue fine et homogène, à carbures finement dispersés. <15% de particules présentant une microstructure indésirable	Martensite revenue fine et homogène, à carbures finement dispersés	Norme AMS plus précise, impact sur l'homogénéité et la casse des billes
Contamination	< 1% de particules non-magnétiques (scories..)	Pas de particules angulaires, poussière, huile, graisse	Attention aux particules non-métalliques (scories) et aux contaminations
Forme	< 5% de particules allongées (longueur > 2 x largeur)	< 3 à 7% de formes marginales (selon la taille) < 1% de formes inacceptables	Norme AMS plus précise et plus restrictive
Défauts internes	<15% de grains présentant un défaut yc <ul style="list-style-type: none"> < 10% porosités < 10% retassures < 15% fissures 	<15% de grains présentant un défaut yc <ul style="list-style-type: none"> < 10% porosités < 10% retassures < 10% fissures 	AMS : moins de tolérance sur les fissures (casse)

Figure 11.9 Exigences normatives différentes entre les normes AMS et SAE

12. OPTIMISATION DU PROCESS DE QUALIFICATION DES PARAMETRES DE SHOT PEENING J. GUILVARD (EMGP – Groupe EMI)

D'après EMGP, la détermination des paramètres du process de grenailage de précontrainte reste empirique, malgré les progrès de la simulation numérique. En effet, afin de mesurer précisément l'apport du grenailage de précontrainte, il est généralement nécessaire de passer par une phase d'essais expérimentaux sur pièces réelles.

Pour réduire les coûts induits par cette phase de développement, EMGP a étudié différents cas d'application. Ces études ont permis de développer une méthodologie de qualification des paramètres sur éprouvettes de fatigue. Cette méthodologie permet ainsi d'approcher et de simuler expérimentalement le processus d'endommagement du matériau afin d'approcher le gain sur la tenue à la fatigue induit par le traitement de grenailage de précontrainte.

(Contenu de la présentation non communiqué)

RÉSUMÉ DES PRÉSENTATIONS FAITES LORS DE L'HÄRTEREIKONGRESS

à Wiesbaden (Allemagne)

du 9 au 11 octobre 2013.

1. Point de vue sur l'augmentation des exigences sur les produits en acier

C. Günter (*Innovation Saarstahl AG. Völklingen*).

Les nuances d'acier et produits métallurgiques doivent répondre à un accroissement de nouvelles exigences en termes de résistance et ductilité, durabilité, résistance à la corrosion, usinabilité etc. En même temps ; tous les intervenants de la chaîne d'approvisionnement doivent répondre aux demandes de réduction des prix. Pour satisfaire ces exigences les aciéristes et transformateurs sont condamnés à proposer une amélioration continue de leurs produits et processus.

Ainsi les aciéristes poursuivent une recherche de propreté, d'homogénéité des structures et des qualités des surfaces de leurs produits. Pour cela il faut garantir une maîtrise de plus en plus importante des compositions chimiques et autres spécifications dans une gamme de tolérance de plus en plus étroite.

Pour cela des efforts importants en matière d'investissement ont été réalisés dans les usines sidérurgiques pour optimiser les processus. Les sites de fusion incluent les moyens de MSR (Mechanical Soft Reduction), de laminage de produits longs et les moyens de traitement thermique associés.

Certaines nuances d'acier ne peuvent pas encore être améliorées, les aciéristes et transformateurs ont avec les utilisateurs finaux développé de nouveaux concepts de nouvelles nuances en étroite collaboration. Ainsi, les nouvelles nuances d'acier peuvent contribuer à l'amélioration des coûts, en diminuant le nombre d'étapes de traitement, en apportant une meilleure durée de vie, une plus grande durée des outils etc.

L'auteur propose une réflexion sur les évolutions des procédés et produits dans l'industrie de l'acier pour les quelques années à venir.

2. Cinétiques de transformations isothermes pour les aciers bainitiques à haute performance.

F. Marchal (*CREAS ASCOMETAL France*).

Pour de nombreux organes mécaniques exigeant des performances élevées, les aciers bainitiques sont une intéressante alternative aux aciers trempés et revenus. En plus des aspects économiques et environnementaux dus à l'absence de traitement thermique et par conséquent de moindres déformations après forgeage. Ces nuances offrent un

meilleur compromis résistance à la fatigue, usinabilité comparés aux nuances avec traitement thermique ou aux nuances à durcissement par précipitation (AFP). Il n'est donc pas surprenant que ces nuances occupent un part de marché en croissance pour la fabrication des pièces forgées.

Cependant, une des difficultés potentielles avec l'emploi de ces nuances bainitiques est le risque de dispersion des caractéristiques mécaniques en l'absence d'une maîtrise de leur traitement thermique. Dans le travail présenté sont étudiées les causes des origines des variations de microstructure et de propriétés mécaniques pour les nuances d'aciers bainitiques destinées aux pièces forgées. L'étude porte sur différentes nuances, pour des produits de diamètre équivalent allant de 16 à 160 mm et pour différentes conditions de refroidissement (naturel, air soufflé, etc.).

Les résultats sont interprétés au travers des cinétiques de transformation bainitique des aciers étudiés.

Ils montrent que les dispersions obtenues dans une configuration de nuance et de dimensions et forme sont inférieures ou égales aux solutions traitées et meilleurs que celles des aciers à durcissement par précipitation.

3. Résistance aux chocs des aciers d'outillage destinés à la fabrication des outils de coulée sous pression.

S. H. Wüst (*Volkswagen Kassel Gießereientwicklung*).

Une des techniques de production performante pour la fabrication des pièces en alliage léger est la fonderie sous pression. Durant la production les moules sont soumis à des cycles thermiques de chargement qui limitent leurs durée de vie. Par conséquent les investigations sur les mécanismes d'initiation des fissures et de leur mode de propagation avant rupture sont importantes à conduire.

En plus de l'acier H11 (X37CrMoV5-1) conventionnel pour outil de travail à chaud des variantes sont disponibles sur le marché. Leurs conditions de traitement thermique sont comparables à la nuance H11 mais ils présentent des variations de composition chimique. Selon une méthodologie donnée 5 différents nuances ont été comparées à l'acier H11 de référence. Les sollicitations appliquées correspondent aux valeurs minimales et maximales en termes de température et de conditions de refroidissement comparables à celles rencontrées en service sur les moules. Les fissures sont caractérisées quantitativement et qualitativement .. A partir d'un niveau de dureté de 43 HRC des investigations d'analyse métallographiques sont réalisées avant et après traite-

ment thermique selon les normes NADCA.

En dépit d'une microstructure convenable, la macrostructure peut présenter des différences notables. Les différences de comportement vis-à-vis de la fissuration sur les aciers à outils sont identifiées.

Texte complet paru dans HTM 3/2013, page 150.

4. Réponse au traitement de cémentation et propriétés obtenues avec les aciers à roulement de cémentation au nickel et sans nickel.

A. Le Bigot (*CREAS France*).

Les nuances d'acier pour roulement au nickel font partie des nuances de cémentation exigées. Les additions de nickel sont souvent prescrites pour obtenir une augmentation supposée de la ductilité et d'une plus haute résistance à l'oxydation interne durant la cémentation gazeuse. La littérature fournit également de nombreuses études sur le rôle du nickel sur la trempabilité.

Avec l'augmentation des prix du nickel, il y a une forte incitation à remplacer les aciers pour roulement au nickel par des nuances Mn-Cr, Cr-Mo ou Mn-Cr-Mo et à connaître les différences de propriétés par rapport aux aciers au Ni.

Dans l'étude, dans un premier temps la réponse à la cémentation gazeuse de la nuance standard 18CrNiMo7-6 est comparée à des nuances alliées au Mn-Cr-Mo en termes de profondeur de cémentation et d'oxydation intergranulaire, dans un second temps la résistance à la fatigue pied de dent des engrenages, est évaluée sur des éprouvettes de laboratoire et sur pièces réelles.

5. Développement des contraintes résiduelles et déformations lors de la trempe par induction. Identification des mécanismes à partir d'un modèle numérique et de l'expérience.

M. Schwenk (*Karlsruher Institut für Technologie*).

Un modèle adapté aux conditions spécifiques du chauffage par induction tels que l'austénitisation de courte durée avec une réponse magnétique non linéaire et une microstructure initiale de trempe et revenu a été élaboré sur un acier AISI 4140. Les déformations de transformation ont été modélisées à partir des conditions de température et de composition chimique. La validation a été réalisée par des essais de trempe par induction mono-fréquence ou double fréquence avec relevé des profils de dureté et de contraintes résiduelles obtenus. Les corrélations entre le modèle et les expérimentations sont bonnes dans la mesure où on considère que le développement du champ de contrainte n'est pas li-

néaire. Les déformations sont en relation avec la profondeur de trempe.

Des investigations complémentaires montrent que la température à cœur contribue significativement au développement des contraintes résiduelles et au taux de contraintes en compression. Le modèle s'est ainsi enrichi de l'influence de facteurs complémentaires contribuant à l'intensité des contraintes développées et à une meilleure compréhension des mécanismes.

6. Analyse non destructive des contraintes résiduelles sur des arbres trempés par induction, issus de différents procédés d'étirage.

J. Dong (*Stiftung Institut Für Werkstofftechnik, Bremen*).

Les différentes étapes intervenant lors de la fabrication d'un produit (coulée continue, laminage à chaud, recuit, redressage, étirage à chaud, pré-redressage et polissage, usinage, durcissement par induction et polissage) sont à l'origine des déformations constatées sur le produit final après le dernier traitement thermique.

Dans l'étude présentée des mesures par une méthode non destructive de diffraction neutronique, ont été effectuées à différents stades de l'élaboration du produit afin d'évaluer le potentiel de déformation lié à ces différentes étapes, sur des axes en acier AISI 1045 de diamètre 20 mm et longueur 200 mm. Les mesures ont été effectuées à travers la section en direction radiale et tangentielle.

Les résultats montrent une distribution non symétrique des contraintes résiduelles après le pré-redressage avant l'enroulement des fils en bobine. L'étirage à froid crée des tensions résiduelles élevées en surface dans les directions radiales et tangentielles tandis que des contraintes de compression élevées sont produites à cœur particulièrement dans la direction axiale. Les contraintes résiduelles sur les barres étirées sont largement réduites par les opérations de redressage et polissage. Le traitement par induction final modifie l'état de contraintes résiduelles en fonction des paramètres du processus de traitement. L'influence des différentes étapes sur l'état de contrainte est mise en relation avec le constat de déformation.

7. Simulation du revenu sur des pièces de fortes épaisseurs en acier X40CrVMo5

A. Eser (*Karlsruher Institut für Technologie*).

Le revenu est la dernière étape du traitement thermique qui va déterminer l'état de contrainte final

ainsi que les dimensions. Les déformations durant le revenu d'une pièce avec une structure martensitique peut être décrite qualitativement selon la température et le temps de maintien lors du revenu. La déformation d'une structure bainitique est aussi bien connue.

Des dilatométries lors d'un revenu ont été réalisées sur des échantillons présentant des structures martensitiques et bainitiques sur l'acier 1.2344 (X40Cr-VMo5-1). Les cinétiques de décomposition de l'austénite résiduelle en bainite et martensite ont été étudiées par dilatométrie et mesure calorimétrique. L'étude expérimentale permet d'évaluer la relaxation des contraintes qui dépend de la limite élastique pour des températures et des phases déterminées et les courbes d'évolution qui dépendent de la plasticité du matériau.

L'objectif de cette étude est de prévoir les déformations et relaxations des contraintes résiduelles sur des pièces épaisses en acier 1.2344 durant le durcissement par trempe et revenu. Le logiciel commercial FEM est destiné à prévoir les déformations et contraintes résiduelles de pièces durant le traitement thermique avec une structure mixte de martensite bainite et austénite résiduelle. Pour vérifier les résultats des pièces de forte épaisseur ont été trempées et revenues et les résultats de la simulation ont été comparés aux résultats expérimentaux.

8. Etude comparative entre huile et solution aqueuse de polymères comme fluide de refroidissement sur leur effet sur les déformations de bagues de roulement de faible épaisseur.

T. Wolfrath (*FUCHS Europe Schmierstoffe GmbH*).

La présentation concerne la trempe de bague de roulement en acier 100Cr6 en comparant une huile de faible viscosité avec le fluide à base de polymère type PVP Thermisol QZS 150 MM et de leur effet sur les variations dimensionnelles et le risque de tasure. L'effet de la concentration est présenté.

9. EcoForge : production de pièces en acier HDB (High-Strength, ductile bainitic) par un process de forgeage optimisé.

M. Fisher (*Institut für Eisenhüttenkunde*).

En substitution aux procédés conventionnels dans un objectif de réduction de la ligne de production de pièces forgées à hautes performances dans une perspective d'économie des matières premières et de l'énergie, de nouveaux procédés proposant avec de nouveaux aciers, des gammes intégrant différentes opérations. Ces nouveaux procédés per-

mettent d'économiser plus de 30% d'énergie sur l'ensemble de la gamme de production. Ce projet EcoForge rassemble 5 centres de recherche.

L'emploi des aciers HDB (High strength Ductile Bainitique) permettent de regrouper traitement thermique et mise en forme ou forgeage à haute température. En utilisant la chaude de forge pour le traitement thermique, on évite le réchauffage pour traitement thermique. La transformation structurale est contrôlée par une sonde de détection de la microstructure et maîtrisée par l'utilisation d'un flux de refroidissement variable pour la trempe.

Les microstructures formées sont quantifiées à l'aide d'un développement nouveau d'analyse d'image par MEB en continu. Simultanément aux analyses expérimentales, des développements numériques permettent de modéliser les évolutions microstructurales.

10. Influence d'un forgeage à froid et d'un traitement thermique sur les modifications dimensionnelles et de forme.

D. Nadolski (*SIW Bremen*).

La forge à froid est un moyen de production de type « near net shape ». Les pièces forgées à froid sont le plus souvent l'objet d'un traitement thermique final pour obtenir les caractéristiques d'emploi qui pour effet de modifier les dimensions et formes. Les déformations des pièces forgées à froid, diffèrent considérablement des pièces produites par exemple par usinage.

Sur des éprouvettes de forme simple produite par un procédé d'extrusion-filage, des relations fondamentales entre le matériau, le procédé de formage et le traitement thermique final sont établies. Après extension à d'autres procédés de forgeage à froid et paramètres de traitement thermique, des facteurs significatifs et leurs interactions sur les variations dimensionnelles sont ainsi déterminés.

Le résultat est une meilleure compréhension des facteurs sources de déformations dans une perspective d'optimisation de la gamme de production.

11. Ingénierie de la sécurité dans les ateliers de traitement thermique.

F. Treptow (*Aichelin GmbH*).

Les ateliers de traitement thermiques sont associés à des risques. Ces risques n'ont pas sensiblement évolué dans les décades précédentes même si l'attente des employés n'a pas cessé d'augmenter, conduisant à la mise en place de plans de prévention plus sévères et à une évolution de la réglementation qui a évoluée significativement ces dernières

années. Parmi d'autres, l'auteur cite la Directive machines, les nouvelles normes EN 746 part 2 et ISO 13 849, EN 954. Différents incidents survenus ces dernières années ont incité les constructeurs et utilisateurs à renforcer les exigences en matière de sécurité.

La présentation propose un certain nombre de questions clés conduisant à des suggestions de proposition pour établir des plans de sécurisation.

12. Tour d'horizon et développements des technologies de fours industriels pour traitements thermiques.

O. Irretier (*IBW Kleve*).

Les traitements thermiques sont régis par les paramètres temps, température, atmosphère, pression, refroidissement ou trempe. La présentation propose un tour d'horizon des technologies de traitement développées ces dernières années et les perspectives à venir.

A côté des deux conceptions four continu ou four à charge, les fours sont distingués selon leur mode de trempe par un fluide gazeux ou liquide. Cette base est présentée selon VDMA 24 202.

Les innovations apportées concernent l'amélioration de la qualité des pièces traitées avec moins de déformations grâce à de meilleures atmosphères et températures homogènes. En complément, d'autres aspects sont pris en compte : meilleure efficacité énergétique par le choix des moyens de chauffage (brûleurs) de l'isolation...

13. Conception de la chambre de chauffe (casing) et du système de refroidissement gazeux sur les fours à vide monochambre.

B Zieger (*Schmetz GmbH*).

Présentation des solutions proposées par le constructeur Schmetz pour la conception de ses fours proposant selon les applications différentes formes et tailles de chambre associées à des modes de refroidissement gazeux variables (unidirectionnel, multidirectionnel).

14. Développement de la nitruration ionique et nitruration ionique post-oxydée par application d'un revêtement DLC complémentaire pour améliorer les performances d'usure et tenue à la corrosion.

T. Mueller (*Rübig GmbH & CoKG*).

Présentation de la technologie développée par Rübig déjà présentée sur les procédés de nitruration ionique post-oxydée dont les performances en usure et corrosion sont améliorées par un revêtement DLC réalisé sur la couche blanche. L'adhérence de la couche DLC sur la couche blanche est obtenue grâce à un revêtement Si-DLC réalisé dans un réacteur industriel à décharge de type DC (courant direct pulsé). (Cf publication dans la revue *Traitements et matériaux*.)

15. Le milieu de trempe idéal ? Caractérisation des nouveaux liquides de trempe.

M. Beck (*Lehrstuhl für Werkstofftechnik Universität Rostock*).

Lors de la trempe avec des liquides vaporisables, le phénomène de caléfaction est une cause de refroidissement hétérogène.

Une nouvelle classe de fluides sans caléfaction importante est étudiée. Ces fluides doivent être à même de produire des vitesses de refroidissement suffisamment élevées et homogènes. On connaît les bains de sels ou métalliques fondus présentant cette propriété mais ils nécessitent d'employer des bains à une température relativement élevée et nécessitent un nettoyage délicat des pièces trempées. Des échantillons métalliques cylindriques ont été trempés dans ces différents nouveaux bains de trempe pour différentes compositions et températures. Les courbes température-temps ont été tracées et les coefficients de transfert déterminés en comparaison avec l'eau. Les résultats montrent un potentiel énorme d'augmentation des vitesses de refroidissement et d'homogénéité. En plus du pouvoir de refroidissement la stabilité thermique a été évaluée, ainsi que les coûts, les conditions de travail et sécurité, et les conditions de nettoyage.

Texte complet paru dans HTM 5/2013 Vol 68, page 214.

16. Evolution dans le temps des moyens de pilotage et surveillance.

K. M Winter (*Process Electronic GmbH*).

Face à la demande de performances, les moyens de pilotage et contrôle des process de traitement thermique doivent être également de plus en plus performants.

La communication présente les derniers moyens disponibles et leur évolution au cours du temps pour la surveillance des procédés de traitement thermique et plus particulièrement pour les traitements de cémentation et carbonituration. Les perspectives à venir sont également proposées.

17. Indentation instrumentée pour la mesure de la profondeur de cémentation et des caractéristiques superficielles sur un acier 20MnCr5.

A. Irretier (*SIW Bremen*).

Les mesures de dureté sont un moyen rapide de contrôle des couches cémentées. La dureté peut être traduite en résistance à la rupture par traction. Les conditions de mesure de dureté doivent correspondre à la norme DIN EN ISO 14577.

L'application de cycles d'indentation sur des échantillons en 20MnCr5 cémentés avec différents teneurs en carbone superficiel variant entre 0,5 et 0,9 % en masse et des profondeurs allant jusqu'à 1,0 mm permet de déterminer les propriétés mécaniques telles que la limite élastique à 0,2%.

18. Contrôle de la qualité des couverts de table à l'aide d'essais de corrosion de courte durée.

P. Rosermann (*Otto-von-Guericke-Universität*).

La résistance à la corrosion des aciers inoxydables martensitiques est un critère de qualité important dans la production des couverts. Le contrôle le plus communément utilisé est un essai de corrosion par immersions alternées, méthode destructive, longue avec des résultats discutables. Ces dernières années de nouvelles approches ont été développées en employant des méthodes d'essai de corrosion de courte durée et non destructives. La présentation décrit une méthode d'essai de corrosion de courte durée qui met en évidence les effets des traitements thermiques et de surface, basée sur une méthode d'analyse du « bruit électrochimique ».

Cette méthode est capable de donner des résultats rapides et objectifs de contrôle durant les étapes de fabrication et de finition des produits. L'utilisation du bruit électrochimique comme moyen de détection de l'initiation de la corrosion sans être amenés à réaliser des essais destructifs. Afin d'offrir une méthode d'emploi pratique plus facile, l'essai au test KorroPad est utilisé comme alternative à la méthode du bruit électrochimique. Les deux méthodes offrent un moyen en bonne corrélation avec la tenue des couverts en acier inoxydable.

Texte complet paru dans HTM 5/2013 Vol 68, page 224.

19. Détecteur de fissures QASS, durant la trempe.

U. Seuthe (*QASS GmbH*).

Les fortes contraintes mécaniques développées durant la trempe peuvent être à l'origine des fissures et microfissures. L'apparition d'une fissure libère une énergie qui émet un bruit se propageant à très

grande vitesse dans le solide. Ces bruits se superposent aux autres bruits tels que les vibrations structurales développées par le champ électromagnétique lors d'un chauffage par induction, par le bruit des brûleurs à gaz, les circuits de refroidissement, le bruit lié à la trempe.

Il est possible de distinguer ces différentes sources de bruits, en particulier on est capable de reconnaître les signaux provenant de la fissuration. Le chauffage par induction est un bon sujet d'application car il est facile de placer les sondes. Le système QASS est très sensible à la mesure d'ondes dans le métal. Le transducteur relié directement au matériau transmet le signal à une chaîne de mesure. Il permet ainsi de détecter la formation de tapures. Il permet de mettre en place un contrôle à 100%.

20. Matrices de forges nitrurées.

S. Hoja (*SIW Bremen*).

La tenue aux fortes charges des matrices de forge est le plus souvent améliorée par les traitements de nitruration ou nitrocarburation. On ne connaît pas forcément très bien les origines de l'amélioration apportée. Le travail présenté est une étude des différentes configurations de couches obtenues sur un acier X38CrMoV5-3 par différents procédés : nitruration ou nitrocarburation gazeuse classique, nitruration ionique dont le procédé avec écran actif, nitruration sous pression réduite et association nitruration gazeuse et plasmas associées. Ces différents résultats ont été transférés sur des matrices industrielles utilisées en production de série afin de déterminer l'effet de ces couches sur leur durée de vie. A l'issue de leur temps de vie, les parties critiques de l'outil ont fait l'objet de relevés topologiques et métallographiques afin de déterminer les mécanismes d'usure. Ainsi différentes recommandations sont proposées pour offrir de meilleures performances.

21. Nitruration et nitrocarburation de produits longs en acier bainitique à haute résistance.

M. Lembke (*Steeltec AG, Emmen, Schweiz*).

Les aciers à haute résistance offrant des résistances comprises entre 900 et 1400 MPa permettent de produire des pièces sur lesquelles on peut s'affranchir du traitement de trempe et revenu.

La résistance à l'abrasion peut être améliorée par des traitements ou revêtements de surface. Pour les aciers bainitiques, les traitements de nitruration sont une bonne solution, les températures de traitement étant assez basses pour ne pas affecter leur structure et niveau de résistance. En partenariat avec l'IWT de Bremen, Steeltec a testé les traitements de

nituration et nitrocarburation sur sa gamme d'aciers HSX en les comparant à des nuances conventionnelles. Les relevés de dureté, de microstructure et des profils de composition par SDL ont été réalisés. Des couches régulières et compactes d'épaisseurs comprises entre 5 et 15 μm sur les nuances bainitiques. Les duretés des couches obtenues ont été supérieures à la nuance 38MnVS6.

22. Mesure de la limite d'endurance d'aciers carbonitrurés.

C. Stöberl (*SIW Bremen*).

La cémentation est un des traitements capables de mettre les surfaces en compression et d'augmenter la durée de vie des organes ainsi traités. La carbonituration qui apporte en plus du carbone de l'azote est un moyen utilisé pour obtenir un gain supplémentaire notamment sur les engrenages.

La limite d'endurance en flexion a été mesurée sur des aciers 18CrNiMo7-6 et 20MnCr5. Sur ces deux nuances différentes conditions d'état de surface et de traitement ont été testées, en comparant la cémentation gazeuse à une carbonituration avec un faible taux d'azote 0,2% et plus haute teneur en azote 0,45%. Les essais ont été réalisés avec des effets d'entaille $R=-1$ et $R=0$.

23. Etude de l'influence d'une couche nanostructurée superficielle sur la tenue en fatigue superficielle sur acier AISI 4140.

A. Erz (*IAM-WK*).

Les caractéristiques de l'extrême surface sont très importantes sur la tenue en fatigue. Les effets des contraintes résiduelles et des états de surface sont déterminants. Le travail présenté s'intéresse à l'influence de la microstructure superficielle, à la taille du grain notamment. Des structures nanocristallines peuvent être obtenues par différents moyens parmi lesquels le micro-peening. Des méthodes d'usinage particulières peuvent également produire des structures superficielles nanocristallines. Pour cela on utilise des paramètres de coupe avec une faible profondeur de passe a_p et un rayon de l'angle de l'outil r_β de coupe élevé. L'étude montre que la création d'une couche nanocristalline offre un fort potentiel d'augmentation de la durée de vie.

L'étude réalisée se focalise plus particulièrement sur des échantillons usinés par tournage. La micro géométrie du profil de coupe est modifiée par une rectification par chariotage. Pour une valeur minimum de profondeur de coupe a_p , l'influence du rayon de coupe r_β sur la couche nanocristallisée, en combinaison avec a_p été étudiée.

Parallèlement on a étudié l'influence du traitement

thermique sur la couche nanocristalline, sur sa stabilité thermique lors du traitement à des températures élevées.

24. Etudes in situ de la transformation martensitique par rayonnement synchrotron, application à l'acier 20MnCr5.

J. Epp (*SIW Bremen*).

Des études par diffractions de RX durant la transformation martensitique de l'acier SAE 5120, ont été réalisées à l'aide d'un rayonnement X à l'ESRF de Grenoble sur la ligne ID11. Grâce à l'excellence du rayonnement, les mesures peuvent être effectuées avec une fréquence de 1 Hz tout au long de la durée d'une trempe martensitique par refroidissement rapide.

L'effet de la vitesse de refroidissement en dessous de M_s sur la cinétique de transformation martensitique a été étudié. La dynamique de maintien de l'austénite résiduelle à un taux d'environ 4% en masse pour des refroidissements rapides et de 7% en masse pour des refroidissements plus lents a été identifiée. Pour des temps de refroidissement plus longs la quantité d'austénite résiduelle décroît. La raison de la stabilisation dynamique de l'austénite est liée à une répartition du carbone dans celle-ci, durant la transformation martensitique (et de faibles quantités de bainite). Des teneurs en carbone supérieures à 0,5% ont été observées dans l'austénite alors que l'acier ne contenait que 0,2% de carbone. Les différents modèles de cinétiques de transformation martensitique ont été comparés. L'analyse montre que la relation de Koistinen-Marburger ne s'accorde pas avec les mesures expérimentales alors que d'autres modèles sont satisfaisants.

En complément, l'étude des tailles de grains, des micro-contraintes et de la densité des dislocations qui en résultent durant la trempe donne des informations sur la déformation plastique apparaissant durant la trempe en comparaison avec les duretés obtenues. Ainsi l'influence de la vitesse de refroidissement peut être prédite.

25. Une nouvelle technologie de combinaison de traitement de surface pour les fontes alliées fortement chargées.

A. Buchwalder (*IW TU Bergakademie Freiberg*).

Les fontes alliées sont en développement pour la fabrication de composants. Des traitements de surface sont souvent nécessaires pour améliorer leurs propriétés, la nituration est une solution, toutefois la composition chimique (teneur en carbone et silicium) la présence de graphite rendent difficile l'ob-

tention de couches de qualité. Une solution mettant en œuvre une refusion par faisceau d'électrons suivi d'une nitruration ionique a été développée pour cette raison. Cette solution apporte une amélioration de la résistance à l'usure et à la corrosion.

La refusion par FE est réalisée dans les zones fonctionnelles, elle conduit à une transformation en lé-déburite dure exempte de graphite. Cette couche à une résistance thermique élevée et va servir de support à une couche de combinaison assez fine produite par une nitruration ionique à 590°C. La présentation couvre l'influence des paramètres process de simple et double traitement. La forme du graphite du matériau de base influence le transfert thermique et les résultats de la refusion par FE. La microstructure et la quantité de carbone solubilisé influencent les résultats de la nitruration plasma.

Les essais d'usure ont montré pour de faibles charges une résistance comparable avec le simple ou le double traitement ; pour de fortes charges, la supériorité du double traitement apparaît rapidement. Par ailleurs la création d'une couche superficielle refondue sans présence de graphite apporte une notable amélioration de la résistance à la corrosion.

26. Caractérisation de la résistance des soudures par point des jonctions aluminium – acier.

La soudure par point est une technologie d'assemblage largement utilisée pour la fabrication des caisses en blanc dans l'industrie automobile. Il y a une demande dans le cadre des objectifs d'allègement pour que l'assemblage acier sur acier soit étendu à des assemblages d'autres combinaisons de matériaux. Alors que l'assemblage de composants en aluminium ne pose pas de problème moyennant une modification des paramètres, l'assemblage acier sur aluminium présente plus de difficulté étant donné les écarts de propriétés physiques. Un logiciel de pilotage est alors nécessaire pour réaliser cet assemblage. Un procédé spécial d'assemblage développé par la Sté Fronius Co a permis de réaliser un assemblage entre un alliage d'aluminium à durcissement par vieillissement et un acier de type dual-phase. Les points de soudure ont fait l'objet d'examen au microscope optique et électronique dans la zone soudée et dans la zone affectée par la soudure. Des essais de traction ont également été utilisés pour tester la résistance des assemblages.

27. Ajustement du taux élevé d'austénite résiduelle pour obtenir l'effet TRIP dû à l'aluminium lors du durcissement des aciers à roulement.

H. Surm (SIW Bremen).

Habituellement les aciers à roulement sont trempés et revenu pour obtenir un niveau de dureté donné ainsi qu'un certain taux d'austénite résiduelle. Les aciers martensitiques offrent un niveau de résistance élevé mais avec une faible plasticité. La trempe bainitique est une alternative de traitement pour ces aciers.

Sur différents aciers l'effet TRIP (Transformation Induced Plasticity) est utilisé pour augmenter la résistance tout en gardant une certaine plasticité. Ce mode de durcissement est basé sur transformation de l'austénite en martensite qui s'accompagne d'un gonflement. Dans les premières publications sur ce sujet, on montre que le comportement à la fatigue de ces aciers est amélioré par l'effet TRIP.

La résistance est augmentée par la transformation martensitique et par la création de contraintes de compression élevées contribuant l'un et l'autre au renforcement de la propagation des fissures.

Une proportion adéquate d'austénite doit être présente pour obtenir l'effet TRIP. La composition chimique et le traitement thermique doivent être judicieusement combinés. Par addition de silicium et d'aluminium les précipitations de carbure sont retardées durant le maintien dans l'intervalle de température entre les transformations bainitique et martensitique. Durant cette période l'austénite est stabilisée à cause de son enrichissement en carbone.

Ainsi les aciers à roulement sont des candidats potentiels pour mettre à profit l'effet TRIP.

Dans le travail présenté, deux possibilités de traitement ont été testées (trempe isotherme - trempe et précipitation) par rapport à la capacité de maintien d'une teneur élevée et stable en austénite résiduelle.

Les cinétiques de transformation ont été analysées par des essais dilatométriques. Les résultats ont été complétés par des analyses métallographiques et diffractions de RX.

Texte complet paru dans HTM 6/2013, Vol 68, page 246.

Compte rendu de la journée organisée par la section Sud-Est de l'A3TS le 24 octobre 2013 à Lyon :

« Revêtements DLC, intérêts tribologiques et applications »

Synthèse générale

Les revêtements de carbone DLC de type a-C:H (à teneur en hydrogène comprise entre 20 et 40% d'hydrogène atomique, et 20 à 40% de liaisons sp²/sp³) ainsi que les revêtements ta-C sans hydrogène et WC+C sont reconnus comme étant des revêtements à bas coefficient de frottement.

Les conférences présentées abordent deux grands domaines :

La construction de la couche : sa composition, son support (dureté, état de surface et nature du substrat). On met en évidence les effets de la tribofinition avant revêtement sur des éléments de roulements à billes ou à rouleaux (étude CETIM), en duplex avec une nitruration avec ou sans couche blanche (Thermi-Lyon). Les comportements sous charge élevée ont été étudiés et montrent leur efficacité sur la réduction des couples de roulement et sur l'effet FEB, la tenue en pression de hertz est cependant limitée.

Le comportement des revêtements en milieu lubrifié en conditions limites de lubrification et en conditions hydrodynamiques. Toutes les études présentées par les laboratoires (ECL et IREIS), les producteurs (Sulzer) et les utilisateurs (PSA) montrent que la composition des couches est importante et qu'elle interagit avec la composition des huiles de lubrification et notamment la nature des additifs. Ainsi le développement des couches ne peut pas être dissocié de la nature des huiles (huile de base et additifs extrême pression).

Conférence d'introduction : **Quelques aspects généraux de l'intérêt d'un revêtement pour une application tribologique** P. Kapsa (ECL Lyon)

Après une définition des revêtements DLC et leur positionnement, l'auteur fait un rappel sur les généralités de la tribologie avec ses références historiques, son positionnement selon les applications et analogies avec le monde animal et végétal, ses axes d'études en frottement usure (différents types de tribomètres) et les caractéristiques propres aux revêtements. L'ingénierie des surfaces consiste à adapter la nature de la surface, ses propriétés physiques et chimiques et sa topographie. La texturation des surfaces est un moyen d'action, autant à l'échelle macro que microscopique à laquelle il faut ajouter les effets de la lubrification. L'exemple d'une microtexturation laser d'une couche de DLC est présenté. Deux grands domaines de conclusions sont proposés :

1. Le frottement est caractérisé dans le domaine du frottement par les phénomènes de cisaillement de l'interface liés à l'adhésion, à la résistance des bourrelets en relation avec la plasticité, les effets visqueux déterminés par la mécanique des fluides ; l'usure est en relation avec les phénomènes physicochimiques d'adhésion liée à l'énergie de surface, de réactivité avec l'environnement et les phénomènes mécaniques d'abrasion (propriétés de plasticité, fragilité, dureté, résistance, ténacité) et fatigue

2. La tribologie est un phénomène de surface, une couche superficielle est à même de modifier les comportements mécaniques et physicochimiques. Il faut définir les propriétés physiques intrinsèques de la surface en relation avec les propriétés fonctionnelles dans lesquelles les procédés de fabrication interviennent. L'approche est multicritères vis-à-vis des couches et des procédés : nature et propriétés du substrat ; caractéristiques de la couche de surface : épaisseur, dureté, mode d'obtention ; structure et texture ; environnement fonctionnel. De nouveaux outils et concepts ont besoin d'être définis.

Présentation N°2 **Apports des prétraitements pour l'adhérence des revêtements, application aux DLC.** Q. Contrepois, S. Chomer (Thermi-Lyon)

La nature des couches DLC souvent désignées par le symbole a-C:H signifiant leur nature faite de liaisons Sp³/Sp² de carbone et d'hydrogène (figure 1, voir également fig. 9) est rappelée, ainsi que leurs propriétés principales.

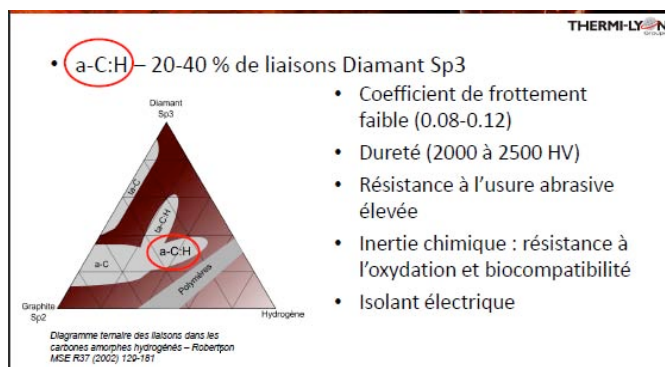


Figure 1 Présentation du DLC

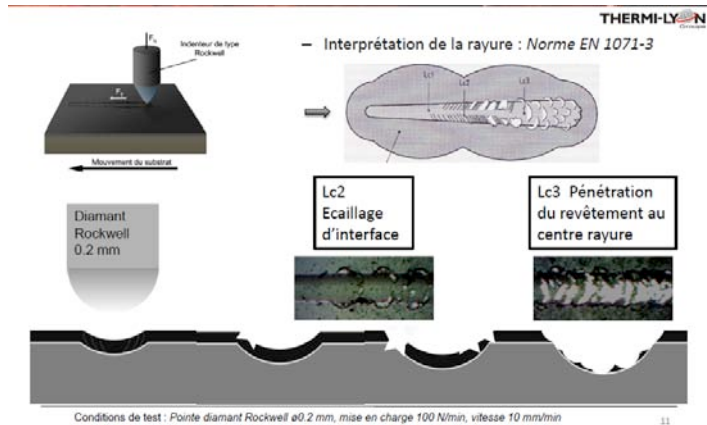


Figure 2 Caractérisation des résultats de l'essai scratch test (Lc2 : longueur de l'écaillage d'interface et Lc3 : longueur de pénétration du revêtement au centre de la rayure)

Une des méthodes de caractérisation des revêtements est l'essai à la rayure ou scratch test, défini par la norme NF EN 1071-3 mesurant les charges Lc2 et Lc3.

Les solutions explorées sont des traitements duplex nitruration + DLC. L'adhérence du DLC obtenue après la nitruration ionique contrôlée sur acier 35CrMo4 et sur acier 32CrMoV13 (figure 3 et 4) est supérieure à la nitruration gazeuse grâce à une meilleure maîtrise de la couche de combinaison, sans reprise entre la nitruration et le revêtement.

DLC épais 2,5 µm THERMI-LYON

	Dureté superficielle	Profondeur de diffusion	Couche de combinaison	Lc2	Lc3	
Pré-traité	300 HV	-	-	7-10 N	15-20 N	
Nitru gazeuse *	>600 HV	0.3 mm	7-12 µm	25 N	30-35 N	
Nitru gazeuse longue*	>600 HV	0.5 mm	9-14 µm	15 N	30-35 N	
Nitru ionique DUPLEX-DLC	>600 HV	0.15 mm	2-6 µm	25 N	40-50 N	

*Reprise de surface nécessaire pour retrouver état de surface applicable pour DLC

Figure 3. Résultats sur acier 35CrMo4 prétraité à 300HV.

DLC épais 2,5 µm THERMI-LYON

	Dureté superficielle	Profondeur de diffusion	Couche de combinaison	Lc2	Lc3	
Pré-traité	350 HV	-	-	7-10 N	15-20 N	
Nitru gazeuse *	>850 HV	0.3 mm	8-10 µm	25 N	50-55 N	
Nitru gazeuse longue*	>850 HV	0.4 mm	12-15 µm	20 N	40-45 N	
Nitru ionique DUPLEX-DLC	>850 HV	0.15 mm	2-4 µm	30-35 N +200 %	> 80N	

*Reprise de surface nécessaire pour retrouver état de surface applicable pour DLC

Figure 4 Résultats sur acier 32CrMoV13 prétraité à 350HV. (Ces résultats sont confirmés sur acier 40CrAlMo6-12)

En conclusion :

Un traitement de nitruration sur acier prétraité à 300-350 HV permet d'obtenir des tenues à la charge nettement supérieures à un acier à 750 HV non revêtu.

- La profondeur de diffusion n'est pas l'élément prépondérant pour la tenue à la charge d'un traitement DUPLEX

- La dureté superficielle compte pour beaucoup mais ne doit pas être dissociée de la structure métallurgique obtenue en surface
- La stabilité et l'homogénéité de la couche de combinaison ont une influence importante sur la tenue à la charge
- **Il n'est pas nécessaire d'éliminer la Couche de Combinaison lorsque la nituration est maîtrisée**

Des exemples d'application sont montrés (vis en 42CrMo4 et rail en acier à outil 38CrMoV5)

D'autres applications sur acier inoxydable AISI 316L préalablement durci par Thermi® SP sont également mentionnées.

Présentation N°3. Etude de l'influence de la composition des couches de DLC sur leur résistance à l'usure en huile de base C. Héau IREIS

Les conditions de l'essai de frottement sont celles d'un déplacement alternatif d'une bille sur un plan en présence de différentes huiles chauffées à 110°C. Paramètres : faible vitesse de glissement (3,5 cm/s) ; pression maintenue à 540 MPa ; Pmax = 810 MPa ; longueur de déplacement 10mm, diamètre de la bille 10mm. Charge 5N, diamètre du contact hertzien 90 µm. Essai réalisé sur 15000 Cycles. Le choix a été fait de revêtir par DLC la bille qui représente la plus grande longueur cinématique de frottement (facteur 110 par rapport au plan). Le régime de lubrification change en fonction de l'usure de la bille, usure minimisée avec le revêtement DLC. La figure 4 montre les différents revêtements testés : dépôts DLC (a-C:H) et ta-C, obtenu par évaporation par arc (à faible taux d'hydrogène), dans différentes qualités d'huiles (SAE 5W30, GIII, PAO, PAO+GMAO)

	aCH 40%	aCH 32%	aCH 26%	aCH 20%	taC
H at %	40	32	26	20	0
E' (GPa)	96	128	190	230	350
Hv (kg.mm ⁻²)	1270	1790	2820	3400	4600
Abrasive wear rate a.u.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	0.74

Figure 4 Caractéristiques des revêtements testés

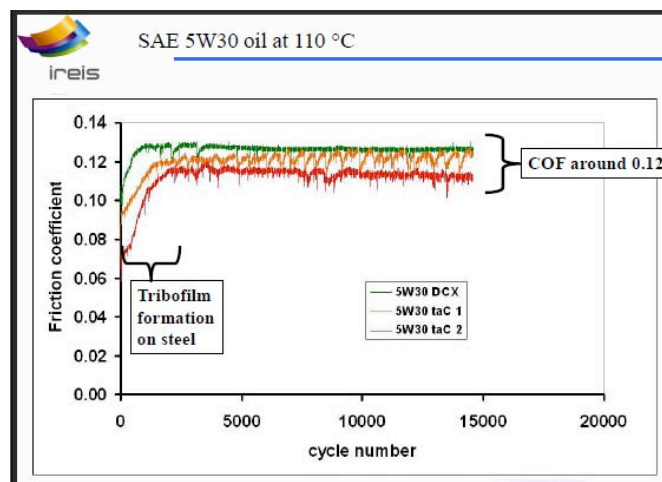


Figure 5 Coefficient de frottement selon les revêtements avec une huile 5W30 à 110°C.

Les coefficients de frottement mesurés avec l'huile 5W30 varient entre 0,07 et 0,11 au démarrage pour se stabiliser entre 0,11 et 0,12 après une période d'adaptation qui correspond à la formation d'un tribofilm sur l'acier. (fig. 5).

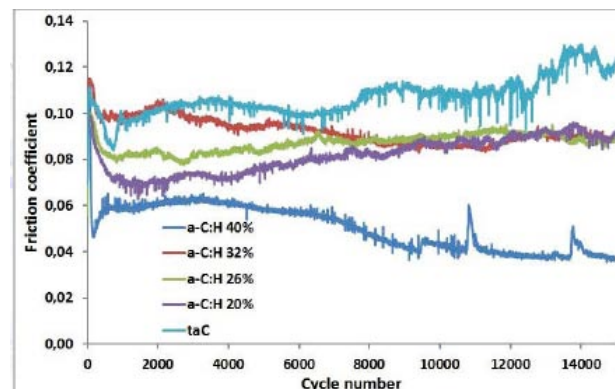


Figure 6 Evolution du coefficient de frottement avec l'huile GIII à 110°C

L'emploi d'une autre qualité d'huile (GIII huile de base neutre utilisée en formulation des huiles de moteurs) (fig. 6) montre avec le revêtement taC une amélioration du coefficient de frottement dans le temps. Les revêtements de type a-C:H présentent des valeurs de COF plus faibles d'autant plus que la teneur en hydrogène augmente alors que la dureté est plus élevée.

Ces résultats sont confirmés avec une autre qualité d'huile (PAO). Après ajout d'un additif (1% de GMO dans la base PAO) ce sont les revêtements taC qui présentent le plus faible coefficient de frottement mais avec le temps celui-ci augmente alors que pour les dépôts a-C:H il diminue et rejoint les valeurs des taC.

Il ressort de cette étude, que l'apport des additifs anti-usure dégrade la valeur des coefficients de frottement qui augmentent durant la phase de formation du tribofilim. Les revêtements taC sont endommagés lors des essais dans les huiles sans additif. Les taux d'usure des revêtements a-C:H décroît quand la teneur en hydrogène augmente (explication ?), les additifs n'ont pas conduit à l'obtention de conditions de frottement exceptionnelles.

Présentation N° 4. Intérêt des DLC pour les applications fortement chargées PF. Cardey CETIM

L'étude est justifiée par l'intérêt de ces revêtements pour la performance des roulements (réduction du couple de roulement) et durée de vie (réduction des faux effets Brinell, FEB). Les risques potentiels estimés sont la diminution de la capacité de charge et de la tenue à la corrosion. Les bagues testées sont en acier 100Cr6 trempé et revenu à 170°C, dont une partie a été testée brut de fabrication et une partie optimisée par tribofinition. Cette dernière ne modifie pas le Ra mais réduit fortement le Rt (de 0,6 à 0,4µm) et le RPC (de 375 à 100 nb/cm). Les dépôts étudiés sont donnés par le tableau figure 7.

Nature des dépôts :

Ref	00	11	12	21	22	31	33	42	41	51	52
Type de dépôts	Brut	aCH	aCH:Si	aCH	aCH:Si	aCH:Si	WC/C	aCH	aCH:Si	aCH	aCH:Si
Accroche	-	W	W	W+Cr	Cr	Ti	W	Ti+Si	Ti	Cr	Cr
Epaisseur dépôt (µm)	-	2,2	2,8	3,7	2,3	1,7	1,3	1,6	2,3	2,8	2,5

Figure 7 Différents dépôts étudiés.

Après dépôt on observe des variations dimensionnelles le plus souvent des gonflements autres que ceux attribués au dépôt, probablement à l'issue des transformations intervenant lors du revenu provoqué par la température de dépôt. La figure 8 corrèle cette évolution dimensionnelle au niveau de dureté obtenu.

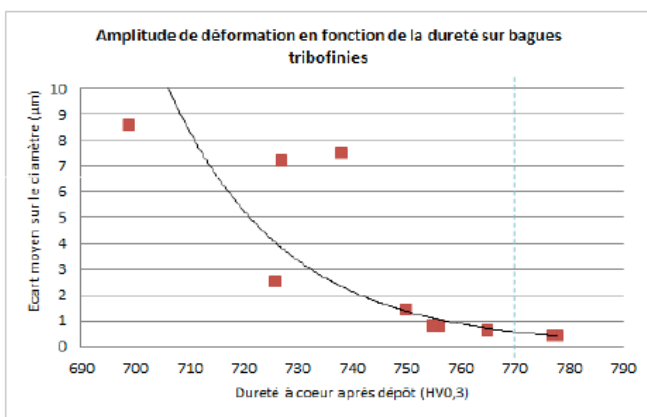


Figure 8 Dureté du substrat après dépôt et variation des diamètres des bagues revêtues.

L'indentation Rockwell C permet d'observer que l'adhérence est en relation avec la dureté du substrat. Les essais de corrosion au BS ne montrent pas de corrélation avec l'épaisseur. Une oxydation générale est observée sur la majorité des solutions après 72 h. Les comportements à la charge sont mesurés sur des roulements dont la bague intérieure est revêtue (milieu lubrifié, vitesse de rotation 2250 Tr/min, charge 3,3 GPa pendant 250h ou arrêt avant si vibration. Les dépôts 33b et 42b sans tribofinition sont arrêtés sur seuil vibratoire avant 250h, tous les dépôts DLC sont écaillés après 250h. Le dépôt 33T (WC/C tribofini ne présente pas d'écaillage.

Le comportement aux faux effets Brinell (FEB) est mesuré sur une butée à billes en milieu non lubrifié. Les DLC sont favorables (fig.9)

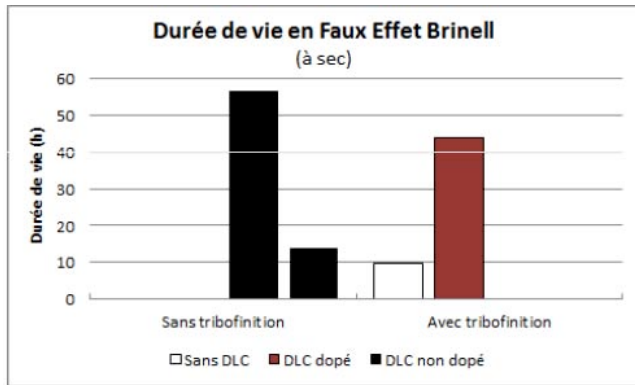


Figure 9 influence des DLC sur la tenue au FEB

L'effet sur le couple de roulement (frottement) et sur le comportement au rodage ont été mesurés sur des roulements à rouleaux coniques, les revêtements étant réalisés sur les rouleaux. Les gains vont de 30 à 70% vis-à-vis du couple et les écarts de couple avant et après rodage sont en moyenne de 5%.

En conclusion, les revêtements augmentent la tenue à la corrosion (importance du taux de recouvrement), la tenue à la charge est limitée (3,3 GPa), le dépôt WC/C avec tribofinition se comporte en tenue à la charge (nature plus ductile). L'adhérence est importante. Des essais à plus faibles pressions devront être réalisés.

Présentation N°5 Pleine optimisation de DLC pour les systèmes mécaniques lubrifiés F. Meunier SULZER

Les caractéristiques physico-chimiques d'une couche DLC, en comparaison de celle d'un alliage métallique, sont très significativement différentes. Cette singularité du DLC lui permet, dans le domaine de lubrification limite (boundary lubrication), de mettre en jeu des atouts comme par exemple une très grande dureté (3 à 5 fois celle d'un acier rapide traité) ou une affinité chimique très faible comparativement aux surfaces métalliques.

Pour améliorer encore ce potentiel singulier des DLC dans le régime « boundary », on y ajoute une réactivité ciblée de la couche de carbone vis-à-vis des composants du lubrifiant, ceci se fera par un dopage ciblé de la structure amorphe du DLC (C+H), l'efficacité de ce dopage dépend :

- du choix judicieux du ou des dopants ;
- de leur mode d'intégration au sein du réseau atomique de base carbone et hydrogène.

En régime lubrifié, comment un revêtement de surface peut abaisser le coefficient de frottement alors qu'un film d'huile continu sépare les deux surfaces ? Une approche est de considérer que l'impact d'un revêtement DLC est d'ajouter dans le système, une composante de glissement de l'huile sur la surface DLC. Si on ajoute une composante de « glissement » de l'huile sur la surface, on abaisse en la vitesse de cisaillement du film d'huile porteur et du coefficient de frottement. Optimiser un DLC passe par une modification de leur capacité à favoriser ce « glissement ».

DLC réactifs pour des régimes « boundary » :

Sur la base d'huiles automobiles standards types E6 (low SAPS) et E7 (high SAPS), un dopage optimisé en silicium et oxygène assure une grande réactivité du DLC. Ce DLC particulier peut être considéré comme un système double squelette de carbone et de silicium. Le silicium forme avec l'oxygène et le carbone et l'oxygène des liaisons extrêmement stables, l'oxygène donne un aspect « polaire » à la surface lui permettant de fixer les additifs de l'huile.

Des tests sur tribomètre type PLINT TE77 montrent qu'avec l'huile type E6 par rapport à l'huile standard, on divise par 20 le taux d'usure mesuré sur une couche DLC dopée. Les additifs fixés sur la surface réactive du DLC jouent un rôle sacrificiel. Ce même type de couches a été testé sur un banc moteur.

En comparaison à la surface nue, le niveau d'usure de l'arbre à cames (AAC) passe de 60/80 µm à quelques 5 µm.

DLC optimisés pour des régimes « boundary » :

En régime hydrodynamique, l'interface se fait uniquement avec l'huile, l'objectif étant plus de travailler sur une notion globale de « mouillabilité ».

De nombreuses études aboutissent à des résultats contradictoires si on considère un seul paramètre, la compréhension passe par la prise en compte d'une approche « cinétique de la mouillabilité ».

Sur des tribomètres type MTM (contact bille & disque rotatif), pour des vitesses de glissements macroscopiques entre les deux surfaces de 500 à 2000 mm/s (P=1GPa), on montre qu'un dopage qui affecte fortement plusieurs paramètres caractérisant l'interaction *huile/surface* conduit à une baisse du coefficient de frottement de 0,06 à 0,04 de façon répétable.

Stabilité thermique : voie d'optimisation de leur résistance à l'usure pour des régimes « boundary » :

Si on considère la notion de coût total « *solution DLC* », il faut considérer l'aspect rugosité des surfaces en frottement : les DLC révèlent leur plein potentiel tribologique uniquement dans une gamme d'états de surfaces qui se situent clairement sous la barre des Ra = 0,10 µm.

Les utilisateurs « série » du DLC mettent souvent en avant sous la forme de « reproche », le caractère trop élitiste des DLC quant à l'état de surface pré-requis ;

Les fournisseurs de DLC mettent en avant l'échelle dimensionnelle de la couche fonctionnelle des DLC (de l'ordre de 1 µm) en comparaison à l'échelle des amplitudes géométriques observées au niveau du substrat (plusieurs microns si on se situe vers Ra = 0,10 µm).

Combattre l'usure dans un régime de contact lorsque la valeur des amplitudes liées à l'état de surface n'est pas « sous le micron », c'est combattre à l'échelle des pics positifs de la surface, la dégradation du DLC sous extrême pression.

Dans ces zones d'extrêmes pressions localisées sur « les pics » de la surface, le DLC se trouve alors principalement sollicité d'un point de vue thermique, et une élévation de température locale trop importante (gamme située au-dessus de 350°C) conduit à une graphitisation de la couche et donc à une chute notable de sa résistance à l'usure.

Une méthodologie d'analyse Raman a été développée spécialement pour les couches minces de DLC permettant de caractériser sur pièce réelle, la zone d'usure de façon comparative. La comparaison est faite à travers l'analyse d'une zone saine « non frottante » de la pièce, d'une zone saine au très proche voisinage de la trace d'usure et enfin d'une acquisition directement dans la trace d'usure. Cet outil d'analyse a permis le développement d'un dopage optimisé qui augmente de plusieurs dizaines de degrés le seuil de température pour le changement DLC vers graphite.

Conclusions :

Les DLC dopés apparaissent comme de plus en plus pertinents pour répondre aux problématiques liées à l'optimisation des couches de DLC, la structure de base C & H seule ne suffira pas à relever tous les challenges. De la même façon, un seul type de dopage ne pourra pas couvrir l'optimisation de tous les aspects d'une solution DLC, mais les voies de compréhension qui apparaissent aujourd'hui permettent déjà des progrès.

Sulzer commercialise une famille de DLC Automobile : A-Carbon, A-Dylyn

Présentation N°6 Apport des couches DLC dans la lubrification limite des moteurs thermiques: Performances et Limites Maria Isabel De Barros Bouchet ECLyon

Sont rappelées le rôle de la composition des lubrifiants sur les régimes de lubrification et notamment des additifs « extrême pression » (tel le ZnDDP, dithiophosphate de zinc et le MoDTC). Pour améliorer les conditions de lubrification aux limites (boundary lubrication) différentes stratégies ont été développées : réduction des additifs contenant du soufre et du phosphore (low SAPS ? Sulfated Ash, Phosphorus and Sulfur), apport de nanolubrifiants et les revêtements de carbone sans ou avec de faible teneur en SAPS. Le positionnement des composés à base de carbone et hydrogène sont donnés dans le diagramme ternaire (Carbone diamant sp³, carbone graphite sp², hydrogène) figure 9. Les caractéristiques des composés utilisés pour les revêtements sont donnés fig. 10.

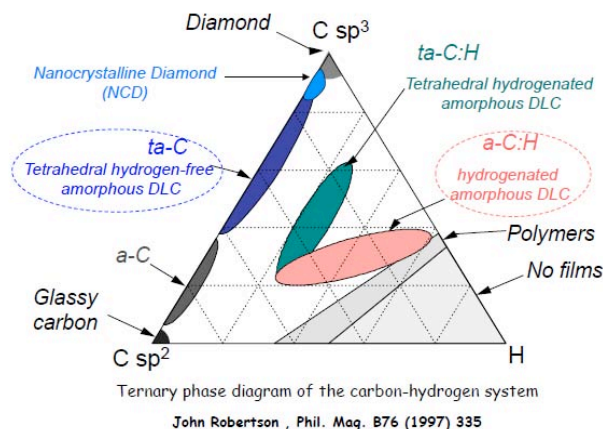


Figure 9 structure des composés C-H

DLC	H content (at. %)	E (GPa)	H (GPa)	RMS (µm)
a-C:H	≈ 45%	≈ 140	≈ 16	0.02-0.04
Ti-C:H	≈ 35% (Ti = 2%)	≈ 80	≈ 10	0.02-0.04
a-C	< 5%	≈ 200	≈ 20	0.04-0.06

Figure 10 Caractéristiques des composés C-H

Le coefficient de frottement mesuré sur un tribomètre bille plan (cf. Conférence N° 3) DLC sur acier ou DLC sur DLC se situe au niveau d'une valeur de 0,1 contre 0,2 à 0,7 sans revêtement. Les apports d'additifs (ZnDDP et

MoDTC) permettent de se rapprocher de la valeur de 0,05 sans réussir à la dépasser. Les additifs forment par transfert des microfilms sur les couches DLC. Les usures sont réduites mais les additifs à composés contenant du molybdène peuvent conduire à une usure du DLC.

Les couches sont observées par microscopie électronique à transmission filtrée à focalisation, focus ion beam (FIB-EFTEM) (fig.11)

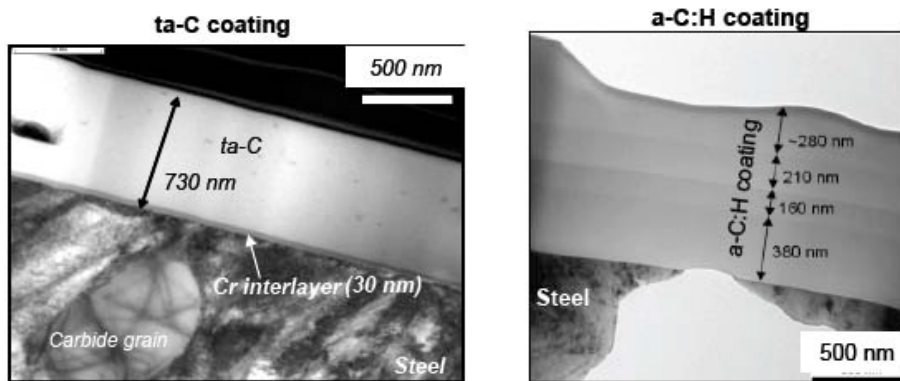


Figure 11 vue des couches observées par EFTEM

L'auteur présente les études des couples revêtements - milieux lubrifiant (bases et additifs). Les additifs C-HO permettent d'atteindre des conditions de très faible frottement. Les mécanismes réactifs entre revêtement et additifs sont proposés. Les conditions de frottement en milieu gazeux conduisant à des réactions d'hydroxylation (cas des carburants automobiles) sont également abordées. Les évolutions de la structure des couches de ta-C ont fait l'objet d'études par des méthodes physiques d'analyse, elles montrent qu'il se produit une augmentation des liaisons sp² dans la plus grande partie du revêtement, une réduction de la densité locale et des contraintes de compression. Ces études ouvrent la voie à de nouvelles formulations de lubrifiants adaptés aux revêtements.

Conférence N°7 Validation du DLC en production série sur poussoir de moteurs M. Moussa Diaby PSA

Les revêtements DLC sont utilisés dans l'automobile sur les poussoirs, segments et axes de pistons pour réduire les pertes par frottement et contribuer aux réductions des émissions de CO₂. Après une étude pilotée par l'étude des moteurs de compétition et pour différentes configurations de revêtements il a été décidé d'appliquer les DLC dopés Si, sur les poussoirs des moteurs essences atmosphériques 1,0 L et 1,2 L.

Après caractérisation des teneurs en sp² et sp³ par analyse XPS et des duretés par nanoindentation, les revêtements provenant de 3 différents fournisseurs ont été testés sur un banc fonctionnant avec une huile OW20 à des températures de 50, 80 et 140°C pour des pressions de Hertz de 200, 280, 340, 480 MPa et pour chaque valeur de pression des fréquences de battement de 10,15 et 20 Hz. Les poussoirs étaient revêtus contre un arbre à came (AAC) en fonte, non revêtu. Les baisses d'émission de CO₂ ont été de 0,5 à 0,6 g.

Les essais réalisés en 2009 sur AAC en 100Cr6 et fritté, huile OW20, avaient révélé des défauts d'adhérence et des usures sur les poussoirs d'admission et échappement. En 2010 l'utilisation d'un dépôt modifié DLC A d'épaisseur 3 µm testés sur moteur 1 L et 2 L atmosphériques avec huile OW20 et 5W30 n'ont pas révélé d'usure après 450 h au banc. En 2013 les dépôts dopés au silicium ont été testés sur moteurs 2 L atmosphérique sans observer d'usure en présence d'huile OW20. Les essais sur moteurs 2 L turbo réalisé en 2011, ont révélé des risques d'usure avec l'huile OW30. Cette huile contient des additifs de type MoDTC.

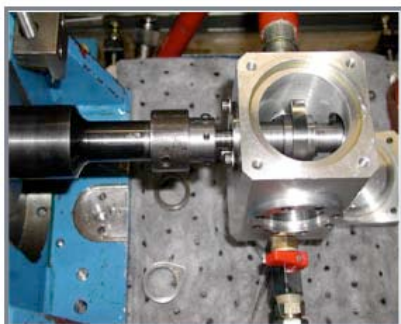
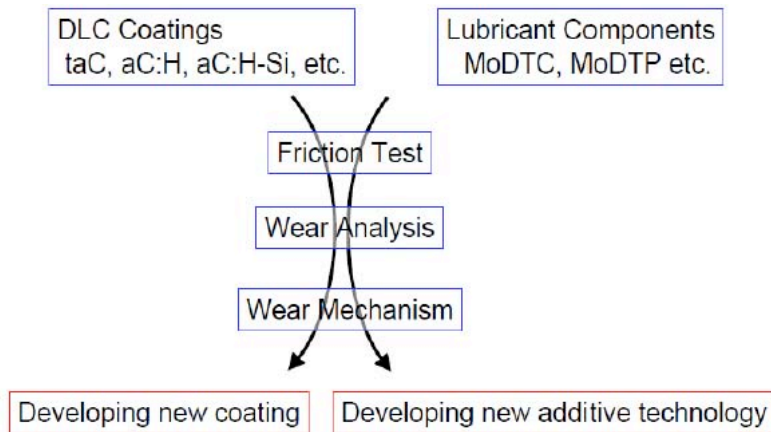


Figure 12 Vue du banc d'essai

Huile Base	HdB 1	HdB 2	HdB 2	HdB 2	HdB 3
Modificateur de frottement	Acide gras	Aucun	MoDTC	Mo organique	MoDTC
Coefficient moyen de frottement	0,09	0,11	0,05	0,05	0,05
Usure du DLC	Non	Non	Oui	Non	Oui

Figure 13 Comportement vis-à-vis de l'usure selon le type d'huile

On a ainsi pris conscience de l'existence de fortes interactions entre les DLC et les nouveaux lubrifiants. Ces interactions sont maintenant prises en compte dès la phase de conception du composant. Par ailleurs, il se pose de plus en plus de questions sur la substitution du DLC par des revêtements ou traitements de surface moins coûteux. La démarche est de développer conjointement les études des revêtements et des lubrifiants (fig. 14)



INDUSTRIE SECURITE

La cémentation gazeuse basse pression et le risque HAP
La cémentation gazeuse basse pression utilisée en milieu industriel consiste à introduire du carbone à la surface de l'acier par craquage de propane ou d'acétylène vers 1000°C et sous un vide partiel de 10 mbar. Dans ces conditions, des goudrons et/ou des poussières sont formés et se déposent dans l'installation. Or ces sous-produits sont très chargés en Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), composés hydrocarbonés toxiques voire cancérogènes comme le benzo(a)pyrène (BaP).



(molécule de BaP, C₂₀H₁₂)

Lors des opérations périodiques de nettoyage et de maintenance à l'intérieur des fours, les opérateurs sont susceptibles d'être exposés aux HAP.

Neuf campagnes ont été réalisées par l'Institut National de Recherche de Sécurité (INRS) sur des sites industriels et l'exposition des salariés a été évaluée par des prélèvements atmosphériques, cutanés et des suivis urinaires. Le BaP a également été analysé dans les dépôts solides prélevés sur les installations.

Les niveaux d'exposition des salariés au BaP peuvent être très élevés : jusqu'à 100 fois la recommandation de 150 ng/m³ de la Caisse Nationale d'Assurance Maladie et jusqu'à 50 fois la valeur limite biologique proposée par l'INRS pour le 3-hydroxybenzo[a]pyrène, métabolite urinaire du BaP ce qui correspond à 500 fois la valeur excrétée par un fumeur. Lors des premières campagnes, les salariés, peu protégés, étaient exposés tant sur le plan respiratoire que cutané. L'analyse des dépôts a montré des teneurs en BaP extrêmement importantes.

La sensibilisation des opérateurs et la mise en œuvre de mesures organisationnelles et d'actions de prévention, en particulier le port d'EPI respiratoires et cutanés adaptés, a permis sur les sites ayant participé à l'étude de réduire les expositions. Mais des dépassements subsistent, principalement liés à la contamination cutanée. L'INRS travaille actuellement sur l'élaboration de solutions permettant d'une part une réduction du risque à la source du procédé afin de générer le moins possible de HAP et d'autre part une séparation gaz-HAPsolides en post-cémentation afin d'éviter

l'encrassement de l'installation et par conséquent la contamination des salariés.

*Catherine Champmartin & Hubert Monnier
Responsables d'études INRS*

*INRS département Ingénierie des Procédés
1, rue du Morvan, 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy
catherine.champmartin@inrs.fr
hubert.monnier@inrs.fr
03 83 50 85 34 / 03 83 50 20 66*

CONGRÈS

6 Février 2014 - Rouen

Normandy Motor Meetings – Journée de conférences : la tribologie, vecteur de performance énergétique de vos systèmes de propulsion – Organisation Pôle MOVEO A3TS
<http://www.a3ts.org>

7 février 2014 - Paris

A3TS : Durcissement superficiel des alliages métalliques : compétition traitements superficiels par voie thermique et traitements de surface par voies sèche et humide ; solutions industrielles actuelles et perspectives
<http://www.a3ts.org>

20-21 février - Barcelone, Espagne

ICCMS 2014, 5th International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation
<http://www.iccms.org/>

21 mars 2014 - Paris

SF2M Journée cent cinquante ans de métallographie à toutes les échelles
<http://www.sf2m.asso.fr/Metallo/Metallographie.htm>

27 mars 2014 - Nancy

Journée A3TS : Matériaux, recherche et procédés. Des solutions pour réduire les coûts et les délais d'étude.
<http://www.a3ts.org>

7-8 avril 2014 - Paris

ESTAD, 1st European Steel Technology & Application Days takes place with the
JSI, 31st Journées Sidérurgiques Internationales
<http://www.ats-ffa.org/jsi30/>

22-26 avril - Marrakech, Maroc

6th International Symposium on Aircraft Materials
<http://acma2014.uiz.ac.ma>

28 avril-2 mai - San Diego, USA

ICMCTF International conference on Metallurgical Coating and Thin Films
<http://www2.avs.org/conferences/icmctf/>

13-16 mai 2014 - Giens, France

SF2M : EuroSuperAlloys2014, 2nd European Symposium on Superalloys and their Applications
<http://www.eurosuperalloys2014.eu/>

12-15 mai 2014 - Munich, Allemagne

European Conference on heat treatment et 21st IFHTSE Congress
www.awt-online.org

21-23 mai 2014 - Barcelone, Espagne

International Thermal Spray Conference and Exposition
<http://www.dvs-ev.de/itsc2014/>

9-13 juin 2014 - Stockholm, Suède

HIP'14 : The international conference on Hot isostatic Pressing.
<http://hip14.se/>

11-13 juin

SF2M FDMD II , The 2nd International Symposium on Fatigue Design & Material Defects
<http://sf2m.asso.fr/FDMD2/FDMD2.htm>

15-19 juin

SCT 2014, Steel in cars and trucks
<http://www.sct2014.com/>

11 et 12 JUIN - REIMS, France

- SVTM 2014
- Congrès A3TS 2014
<http://www.a3ts.org>

Novembre 2014

A3TS : Les peintures : quelles évolutions pour demain ?
<http://www.a3ts.org>

24-28 novembre 2014 - Montpellier, France

Matériaux 2014, Grand Congrès de la Fédération Française des Matériaux
<http://www.materiaux2014.net/pdf/Premiere-Annonce.pdf>

10-11 décembre 2014 - Pau, France

A3TS journées projection à chaud
<http://www.a3ts.org>

DU CÔTÉ DES LABORATOIRES

CONTRIBUTION À L'IDENTIFICATION DES ORIGINES DES DÉFORMATIONS REVELÉES AU TRAITEMENT THERMIQUE. APPLICATION À L'ANALYSE D'UNE GAMME DE FABRICATION D'ARBRES À DENTURES DE BOÎTES DE VITESSES.

Thèse soutenue par Rémi Husson le 10 juillet 2013 à Art et Métiers Paris Tech – Centre de Metz.

Le traitement thermique est un procédé très largement utilisé dans l'industrie automobile et en particulier sur les pièces à dentures. Appliqué en général après usinage, il permet d'améliorer les propriétés mécaniques des pièces. Dans le même temps, plusieurs phénomènes physiques conduisent à des déformations, qui peuvent conduire au non-respect des tolérances dimensionnelles et géométriques. Ces déformations sont certes liées au traitement thermique mais également à l'ensemble de la gamme de fabrication en amont de celui-ci. L'objet de ce travail de recherche est d'améliorer d'une part la connaissance des phénomènes physiques mis en jeu au traitement thermique et d'autre part l'identification des déformations géométriques. Dans un premier temps, les déformations propres à chaque étape de fabrication sont identifiées. Puis au sein de la gamme, les sources d'origine dans la signature géométrique finale sont séparées. Une gamme de fabrication numérique illustre cette méthode. D'autre part, les « contraintes résiduelles » sont identifiées comme influentes sur l'évolution de la géométrie. Leur impact sur les déformations au traitement thermique est obtenu grâce à plusieurs campagnes d'essais sur site industriel. De cette façon, chaque caractéristique géométrique est reliée à une ou plusieurs étapes de fabrication en particulier. Ces résultats fournissent une aide au diagnostic des causes de non-conformités au traitement thermique. En parallèle, des modifications sur la gamme de fabrication sont proposées

http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/90/74/22/PDF/ThA_se_-_Husson_-_2013.pdf

ÉTUDE DE L'ORIGINE DE DÉFAUTS DÉTECTÉS DANS DES PIÈCES EN ALLIAGE D'ALUMINIUM DE LA SÉRIE 7XXX DESTINÉES À L'INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE.

Thèse soutenue par Siham Agouti le 13 décembre 2012 à l'Ecole Nationale supérieure des mines de Paris.

Les travaux de cette thèse concernent l'étude de défauts détectés par contrôle ultrason dans des pièces forgées en alliage d'aluminium destinées à l'industrie aéronautique. Cette étude a été menée sur deux pièces produites par Aubert & Duval en alliage d'aluminium 7050 fourni par Constellium. Ces pièces ont été sélectionnées sur base d'une étude statistique de l'occurrence des défauts sur cinq années de production industrielle. L'une présente un taux de rebut important du fait de ces défauts, l'autre un taux de rebut quasiment nul, bien qu'elles soient produites avec le même matériau. L'étude de l'origine des défauts a été construite autour de deux axes de recherche :

- Axe thermomécanique : formation des défauts pendant la mise en forme par endommagement ductile à chaud.
- Axe matériau : caractérisation des défauts préexistants dans le matériau après son élaboration et non refermés pendant la mise en forme.

L'axe thermomécanique est basé sur la simulation numérique des gammes de mise en forme des pièces industrielles à l'aide du logiciel Forge® 2009. Le deuxième axe est articulé autour de la caractérisation de l'état de porosité dans un matériau modèle présentant une teneur en hydrogène élevée induisant un taux de porosité plus important que le matériau sain utilisé industriellement. De petits lopins de ce matériau modèle ont été soumis à une campagne de compression alternée simulant le forgeage industriel. La campagne de compression a été conçue par simulation numérique afin de reproduire les conditions thermomécaniques industrielles. Deux techniques de caractérisation complé-

mentaires ont été mises en œuvre pour suivre l'évolution de la porosité : détection indirecte par contrôle ultrason à haute résolution spatiale et observations directes par microscopie électronique à balayage. Une méthode d'analyse quantitative des signaux ultrasonores a été mise au point pour ce travail. La comparaison par simulation numérique du procédé de matriçage des deux pièces industrielles étudiées a permis d'écarter l'hypothèse de la création des défauts par endommagement ductile à chaud. Lors du matriçage, la matière est soumise à des chargements globalement compressifs, et le risque d'endommagement est par conséquent très faible. De plus, comme observé lors de la caractérisation des défauts industriels, les défauts présentent un fond lisse, similaire au fond lisse observé sur les rares porosités présentes dans le matériau industriel à l'état brut d'élaboration. Le même type de fond lisse caractérise également les porosités présentes dans le matériau modèle. Cette observation favorise l'hypothèse de défauts provenant d'un défaut préexistant dans le matériau initial (en l'occurrence à partir d'une porosité). Cette hypothèse est par ailleurs cohérente avec le comportement des porosités lors de la simulation du forgeage sur petits lopins du matériau modèle. Les résultats de cette étude montrent en effet que les porosités ont tendance à s'aplatir et à se refermer pendant la déformation plastique à chaud, sans forcément cicatrifier. Les faciès de rupture d'échantillons soumis à de fortes déformations cumulées et ne donnant plus de réponse ultrasonore significative continuent en effet de présenter de petites plages à fond lisse qui témoignent d'une cicatrisation incomplète. Le traitement thermique semble en outre favoriser la réouverture des porosités non cicatrisées (zones lisses) pendant la déformation et leur élargissement (zones ductiles).

<http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/80/29/83/PDF/2012ENMP0055.pdf>

CONTRIBUTION À L'ORDONNANCEMENT DES ATELIERS DE TRAITEMENT DE SURFACE AVEC DEUX ROBOTS.

Thèse soutenue par Sameh Kharrat le 13 décembre 2012 à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

Dans cette thèse, l'auteur s'intéresse principalement à l'étude du fonctionnement cyclique mono-produit des ateliers de traitement de surface. La contribution porte sur le problème d'ordonnancement associé connu dans la littérature sous le nom *Cyclic Hoist Scheduling Problem (CHSP)*. L'objet de cette thèse est de proposer des méthodes efficaces pour la résolution des problèmes de traitement de surface dans le cas où les produits à traiter sont du même type. L'étude porte en particulier sur le cas où le nombre des robots présents sur la ligne est égal à deux, ce qui augmente le nombre des contraintes du problème, sachant que dans le cas mono robot, ce problème a été prouvé NP-Complet. Pour cela, l'auteur propose une méthode qui combine deux heuristiques et un programme linéaire mixte. Cette méthode permet notamment d'affecter les mouvements de transport à l'un des deux robots tout en gérant les risques de collision entre eux, lorsque la gamme opératoire des produits à traiter suit l'implantation des cuves. Par la suite, l'auteur propose une extension du modèle au cas de lignes complexes. Enfin, il étudie le cas d'un fonctionnement mixte, pour lequel il est nécessaire de traiter dans une même installation des produits différents et des rafales de produits

identiques. Dans ces conditions, la solution la plus intéressante pour les industriels est de pouvoir alterner des modes de production dynamiques et cycliques. Pour cela, l'auteur propose une méthode efficace permettant de résoudre le problème d'ordonnancement associé à la phase transitoire relative à ce type de fonctionnement. Elle consiste en particulier à chercher les dates d'entrée au plus tôt des produits. La principale difficulté identifiée consiste ici à passer du mode dynamique au mode cyclique, c'est-à-dire à rejoindre un cycle à partir d'une solution courante donnée, en supposant que ce cycle est connu a priori.

Les méthodes élaborées dans les divers cas traités sont validées par des tests sur des benchmarks de la littérature.

http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/86/42/35/PDF/These_CHTOUROU-KHARRAT_-_Sameh_UTBM.pdf

PRÉDICTION PAR ÉLÉMENTS FINIS DE LA RUPTURE DES ACIERS DUAL PHASE EN UTILISANT UN MODÈLE DE GURSON AVANCÉ.

Thèse soutenue par Joseph Fansi le 2 juillet 2013 à l'Université de Liège et Ecole Nationale d'Arts et Métiers.

L'actuelle investigation numérique du Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) modèle avancé est une extension du travail de Ben Bettaieb et al. (2011). Le modèle a été mis en oeuvre à l'aide d'une sous routine (VUMAT) contenue dans le code commercial d'éléments finis Abaqus/explicit

Le modèle d'endommagement améliore l'original en intégrant les trois mécanismes d'endommagement, la nucléation, la croissance, et la coalescence des cavités.

Le modèle d'endommagement intègre les lois de nucléation et de croissance basées sur les phénomènes purement physiques. Ces nouvelles contributions incluant l'influence de l'écrouissage cinématique, ont été validées par les résultats de mesures expérimentales de tomographie à rayon X à haute résolution. Aussi, l'implémentation numérique de l'écrouissage cinématique dans le modèle modifié a contraint de proposer et de réarranger la définition de la triaxialité que l'on trouve habituellement dans la littérature.

A coté de cela, un second critère d'initiation à la rupture basé sur l'ultime distance inter-cavités a été inclu afin de localiser et de quantifier avec plus de précision la distribution des déformations peu avant que le matériau ne casse complètement.

L'actuel modèle d'endommagement a été appliqué dans des conditions industrielles pour prédire l'évolution de l'endommagement, l'état de contraintes, et l'initiation à la rupture pour différentes géométries de tôles et sur des essais d'emboutissage de tôles minces.

http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/86/90/32/PDF/PhD_Fansi_ULg-ENSAM.pdf

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL ALLIAGE BERYLLIUM ALUMINIUM POUR LE F35.

IBC Engineered Materials Corp en partenariat avec Lockheed Martin cherche à démontrer la viabilité technique et économique du Beralcast pour la fabrication d'un composant d'un système de visée destiné au F35. Le Beralcast est un alliage d'aluminium-Béryllium qui présente un module trois fois plus élevé que l'aluminium avec un gain de poids de 22%. Obtenue par moulage de précision, cet alliage pourrait, selon ses promoteurs, représenter une alternative aux alliages d'aluminium, de titane et de magnésium.

<http://www.ibcadvancedalloys.com/news/2013/12/03/2013/ibc-engineered-materials-working-with-lockheed-martin-to-qualify-beralcast-alloys-for-f-35-lightning-ii-applications/>

ACIER À STRUCTURE DE « SUPER BAINITE ».

Le professeur Harry Bradeshia de l'université de Cambridge a présenté un nouveau matériau, base acier, qui peut après traitement thermique atteindre une résistance de 2,5 GPa tout en ayant une ténacité acceptable. Le principe de durcissement est la formation d'une « superbainite » avec des tailles de cellule extrêmement faibles, inférieures à celles des nanotubes de carbone. La composition de l'acier, déterminée par modélisations et validations expérimentales, doit être très précisément contrôlée. Une dizaine d'éléments d'alliage doivent ainsi être maîtrisés pour former les précipités adéquats et éviter les phases et précipitations nocives. De par sa composition, la nuance est peu coûteuse à fabriquer (1000 T auraient déjà été produites), son traitement thermique est loin d'être conventionnel avec des durées de maintien pouvant atteindre 10 jours à des températures proches de 200°C. Des arbres et des roulements ont été réalisés avec cette nuance, toutefois, le développement de cet alliage pour les grandes structures est freiné par le fait qu'il n'est pas possible actuellement de le souder.

<http://www.thenakedscientists.com/HTML/content/interviews/interview/2152/>

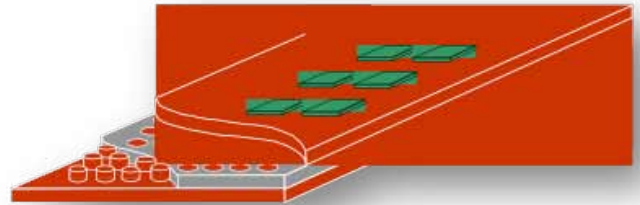
<http://news.engineering.cf.ac.uk/events/209-ndms-prestige-lecture-professor-harry-bhadeshia-university-of-cambridge>

UN NOUVEAU MATÉRIAU POUR PROTÉGER LA SANTÉ DES PUCES.

Les puces électroniques sont fixées par brasage sur des supports qui doivent permettre l'évacuation de la chaleur produite lors du fonctionnement. Dans l'électronique de puissance, en particulier, cette nécessité impose l'utilisation, pour les supports, de matériaux très conducteurs de la chaleur à base cuivre. En fonctionnement, les cycles thermiques générés par l'échauffement des composants électroniques peuvent conduire à des détériorations s'il existe de trop fortes différences des propriétés de dilatations entre le support et le composant.



Dans le cadre du projet MEGaN (financé par la Région Picardie et dont l'objet est la création d'une filière industrielle française de fabrication de modules électroniques) la société Griset a développé en collaboration avec l'Ecole des Mines de Paris, un composite cuivre/Invar avec des ponts thermiques qui permet de concilier les exigences de conductivité et de dilatabilité



coupe du composite cuivre invar avec ponts thermiques

<http://www.griset.com/contact.php>

UNE MACHINE DE TRAITEMENT PAR LASER PERMET D'AUGMENTER LA DURÉE DE VIE DES MATRICES D'EMBOUITISSAGE.

Lors de l'emboutissage, les arêtes des matrices sont fortement sollicitées. En pratique et notamment pour les grosses productions automobiles, il est d'usage courant de réaliser des réparations et des rechargements qui sont coûteux en temps. Parmi les procédés permettant d'accroître la durée de vie des matrices le dépôt par laser s'avère être une voie intéressante. Le métal déposé est fondu par un faisceau laser lors d'une opération de très courte durée de manière à former une couche d'alliage résistant à l'usure.

Les chercheurs de l'institut Fraunhofer ont particulièrement étudié la reproductibilité de l'opération de traitement dans le cadre d'une pratique industrielle. En collaboration avec un fabricant d'outils, une machine conventionnelle de fraisage cinq axes a été équipée de façon à permettre le dépôt laser tout en étant intégrable facilement dans un atelier de mécanique. Par ailleurs, un logiciel permet de gérer automatiquement le processus de dépôt. L'opération peut si nécessaire être simulée auparavant et modifiée. La transmission des données opératoires est réalisée sans aucune nécessité d'interface particulière. La machine a été présentée du 3 au 6 décembre dans le cadre d' EuroMold à Frankfurt <http://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2013/december/tougher-dies-for-automotive-manufacturing.html>

LE SYSTÈME DE CONTRÔLE DE LA PROPRIÉTÉ DES COMPOSANTS « PURICHECK » PEUT ÊTRE RELIÉ À TOUT SYSTÈME STANDARD DE NETTOYAGE.

Les méthodes d'analyse des salissures sont souvent difficiles à mettre en œuvre. Elles comportent généralement : un prélèvement de composants sur lesquels sont recueillies les salissures ; puis, une identification par microscopie.

Avec l'appareil proposé par le Fraunhofer, le système de mesure peut être directement intégré à tout système de nettoyage standard. Il est constitué d'un tamis d'analyse dont la maille est adaptée aux particules que l'on cherche

à identifier et d'une chambre d'analyse. Cette dernière est constituée d'un appareil photo qui enregistre la surface du tamis à des intervalles choisis, et complété par un système d'analyse d'image qui permet d'exploiter les photographies. Le résultat est communiqué à l'utilisateur sous forme de tableaux qui indiquent les quantités de particules observées réparties selon les différentes tailles.



© Photo Fraunhofer IPA :
vue du système d'analyse

<http://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2013/oktober/keeping-an-eye-on-component-cleanliness.html>

REVUE DE PRESSE

EXPERIENCE D'OXYNITRURATION GAZEUSE D'ACIERS À OUTILS POUR TRAVAIL À CHAUD. (ERFAHRUNGEN BEIM GASOXINITRIEREN VON WERKZEUGEN FÜR DIE WARMUMFORMUNG).

H.-J. Spies, H. Zimdars, C. Müller (Texte en allemand).

Les sollicitations des outils de travail à chaud sont variées et il en résulte de nombreuses possibilités de limitation de leur durée de vie. Toutefois comme les détériorations s'initient principalement en surface, un grand nombre de traitements sont disponibles pour améliorer les performances en service. Dans ce domaine, les couches nitrurées s'avèrent intéressantes car elles permettent d'obtenir et de maintenir dans le temps de hautes duretés et de bonnes résistances à haute température. Des exemples montrent le grand potentiel de ces traitements pour l'amélioration des durées de vie des matrices de travail à chaud et ils illustrent les relations entre la structure des couches nitrurées et le comportement en service des matrices

HTM 68 (2013) 6, pages 283 à 289.

L'EFFICACITÉ DE LA TREMPÉ AU GAZ APRÈS CÉMENTATION BASSE PRESSION ET SON INFLUENCE SUR LES PROPRIÉTÉS DE FATIGUE DES ENGRENAGES.

(GAS QUENCH RATE AFTER LOW PRESSURE CARBURIZING AND ITS INFLUENCE ON FATIGUE PROPERTIES OF GEARS).

J. Fahlkrans, A. Melander, S. Haglund (Texte en anglais).

Des modifications du processus et des séquences de trempe au gaz d'engrenages cémentés sous basse pression peuvent permettre d'accroître les performances de 22% si on les compare à celles obtenues par trempe directe. Plusieurs séries d'essais ont été réalisées avec différents types d'interruption de la séquence de trempe, à des températures proches de Ms. L'interruption de la trempe conduit à un accroissement de l'amplitude des contraintes de compression qui a été attribué à l'homogénéisation de la température et à un réarrangement local des contraintes. L'amélioration de la résistance à la fatigue constatée est attribuée au renforcement des contraintes de compression et à la stabilisation de l'austénite.

HTM 68 (2013) 6, pages 239 à 245.

SIMULATION DE LA CÉMENTATION DE NUANCES DE MÉTALLURGIE DES POUDRES : MODÉLISATION DU MATÉRIAU.

(SIMULATION DES EINSATZHÄRTENS GRADIENT PORÖSER BAUTEILE: MATERIALMODELLIERUNG).

P. Nusskern, J. Hoffmeister, V. Schulze (Texte en allemand).

Une nouvelle approche pour la cémentation d'aciers obtenus par métallurgie des poudres est de réaliser une densification avant traitement thermique afin d'éviter la cémentation par les porosités ouvertes. Dans ces conditions, le processus de cémentation et le comportement des transformations dépendent principalement des porosités. La cinétique de diffusion peut être modélisée par des coefficients de diffusion effective. Les transformations peuvent être décrites à l'aide de coefficients qui dépendent du carbone, de la densité et de la température. Cette approche permet de décrire les mécanismes de traitement, sans aucune prétention relative à une approche fine des phénomènes physiques mis en jeu. Les deux modèles réalisés permettent de simuler l'évolution de la microstructure par cémentation d'une surface densifiée de composants obtenus par métallurgie des poudres.

HTM 68 (2013) 6 p. 258–266

ANALYSE PAR DIFFRACTION DE RAYONS X DE L'AUSTÉNITE RÉSIDUELLE DANS DES ÉCHANTILLONS D'ACIER OBTENUS PAR MÉTALLURGIE DES POUDRES.

(RÖNTGENOGRAPHISCHE ANALYSE VON RESTAUSTENIT-GEHALTEN AN PULVERMETALLURGISCH HERGESTELLTEN STÄHLEN).

K. Hradil, A. Avakemian, M. Dlapka, Ch. Gierl-Mayer, H. Danninger (Texte en allemand).

La détermination par rayons X des teneurs en austénite résiduelle dans les aciers est le plus souvent, réalisé en appliquant des méthodes normalisées : ASTM E975-03 ou SAE-SP-452. Ces méthodes qui sont basées sur les rapport des intensités intégrés de pics correspondant aux différents

phases, supposent l'absence de textures dans le matériau et une faible teneur en carbures des échantillons, ce qui n'est pas toujours le cas. Ainsi, les méthodes normalisées indiquent, dans cette éventualité, une plus large dispersion des résultats entre laboratoires. L'article présente une comparaison des méthodes normalisées avec une analyse basée sur l'ajustement du profil complet de la diffraction (Analyse Rietveld). Les essais sont réalisés à titre d'exemple sur des matériaux texturés en utilisant un détecteur 1D en comparaison avec des mesures sur un détecteur 2D avec de grands angles.

HTM 68 (2013) 6 p. 267–273

CÉMENTATION GAZEUSE À LA PRESSION ATMOSPHERIQUE SANS ALTERATION DE SURFACE – PREMIERS RÉSULTATS.

(GASAUFKOHLEN UNTER NORMALDRUCK UND OHNE RANDSCHICHTSCHÄDIGUNG – ERSTE ERGEBNISSE).

S. Bischoff, H. Klümper-Westkamp, F. Hoffmann, H.-W. Zoch, J. Rohde (Texte en allemand).

La cémentation gazeuse classique est réalisée à partir d'atmosphères qui contiennent de l'oxygène. Cet élément conduit inévitablement à un endommagement de la surface sous forme d'une oxydation interne qui consomme le manganèse sous forme d'oxyde. L'IWT de Brème et Rohde Shutegasöfen GmbH ont entrepris des recherches pour tenter de supprimer l'effet de l'oxydation interne tout en restant avec des équipements à faible coût fonctionnant à la pression atmosphérique. Des résultats récents obtenus lors de traitement en usine de production offrent de bonnes perspectives. Ces essais réalisés lors du traitement de couches d'épaisseur 1 mm sur une nuance 18 CrNiMo7-6 (1.6587) avec une atmosphère azote-acétylène pulsée ont permis d'éviter pratiquement totalement la consommation de manganèse et l'oxydation interne.

HTM 68 (2013) 5 p. 199-206

NOUVEAU CONCEPT DE CONTRÔLE PAR BOUCLE DE COMMANDE BASÉE SUR L'AMMONIAC POUR LES NITRURATION ET NITROCARBURATION IONIQUES. (NEUES KENNZAHLBASIERTES REGELUNGSKONZEPT FÜR DAS KONTROLLIERTE PLASMANITRIEREN UND -NITROCARBURIEREN VERBESSERTE PROZESSKONTROLLE DURCH MESSUNG DES AMMONIAKGEHALTS).

H. Klümper-Westkamp, J.-H. Gaus, S. Bischoff, J. Rohde, K.-M. Winter (Texte en allemand).

La nitruration et la nitrocarburation par plasma sont depuis de nombreuses années bien implantées dans les productions industrielles. Ces traitements sont appliqués à de nombreuses nuances d'acier pour améliorer la résistance à l'usure à la fatigue, à la corrosion. Ils sont mis en œuvre par des techniques de décharges pulsées, dans la région des décharges anormales, dans un four chauffé conventionnellement. En ajustant la composition des gaz et les paramètres du plasma, différents composés peuvent être obtenus dans les couches ainsi que des différences de composition, d'épaisseur, de dureté, de morphologie.

A ce jour, les traitements sont mis en œuvre avec des paramètres constants qui doivent être déterminés avant le traitement. Une grande expérience est nécessaire pour déterminer les bons paramètres de production afin de pro-

duire la couche souhaitée et assurer sa reproductibilité. De plus, de nombreux aspects influencent le résultat : taille de la charge, surface de la charge, son état de propreté, les montages, l'homogénéité de température, la propreté de l'installation et son taux de fuite. Tous ces éléments sont difficiles à prendre en compte ; et, pour s'affranchir de ces difficultés, un nouveau concept de contrôle a été développé. Des analyses de gaz, au niveau de l'échappement de l'enceinte de traitement, ont montré qu'ils contenaient des quantités significatives d'ammoniac alors que ce gaz n'est pas introduit dans le cadre du procédé. Ainsi, basé sur l'analyse des gaz et sur les paramètres habituels du traitement par plasma, un procédé de contrôle, en boucle fermée, a été mis au point, permettant l'obtention de couches dont les caractéristiques sont bien maîtrisées.

HTM 68 (2013) 5 p. 208–213

CÉMENTATION GAZEUSE PRATIQUEMENT SANS CONSOMMATION DE GAZ.

(GASAUFKOHLEN FAST OHNE PROZESSGASVERBRAUCH).

D. Joritz, B. Edenhofer (Texte en allemand).

Les fours de traitement thermique et en particulier ceux utilisés pour la cémentation, la trempe et les recuits, utilisent un débit continu de gaz à travers le four. En dépit du fait que la consommation du gaz pour le procédé est considérable et représente un certain facteur de coût du traitement, ce flux est, jusqu'à maintenant, brûlé sans aucune utilité. Une nouvelle technologie utilisant le reconditionnement catalytique du gaz est en mesure de le ramener à son état d'origine, disponible pour être introduit à nouveau dans le four. Cette pratique permet de réduire la consommation en gaz des fours de cémentation et de traitement de près de 90%. Le présent article décrit le concept, la réalisation et la mise en œuvre de cette nouvelle technique de reconditionnement.

HTM 68 (2013) 4 p. 163-169

INFLUENCE DES EFFETS DE LA PLASTICITÉ DE TRANSFORMATION SUR LA SIMULATION DE DURCISSEMENT PARTIELS SOUS PRESSE.

(EINFLUSS DER UMWANDLUNGSPLASTIZITÄT BEI DER SIMULATION DES PARTIELLEN PRESSHÄRTENS).

J. Lütjens, M. Hunkel (Texte en allemand).

L'utilisation de pièces trempées sous presse dans les industries automobiles a augmenté de façon significative durant les dernières décennies. Ce mode de traitement offre l'intérêt de l'obtention de hautes résistances avec une bonne précision dimensionnelle et des possibilités de réduction de poids. Un développement récent du procédé est le durcissement partiel sous presse qui utilise des outils chauffés localement pour produire des zones de températures différentes et ainsi des gradients de microstructure. Même un réchauffage local de la pièce est possible. Ces possibilités ont pour conséquence une grande complexité de l'évolution des sollicitations mécaniques et des températures dans la pièce qui requièrent une modélisation adaptée du procédé. Pendant ces dernières années, un grand nombre de codes ont été adaptés aux nécessités de la simulation des procédés de durcissement sous presse y compris partiel. Les progrès réalisés dans ce domaine incluent la prise en compte dans les modèles : des effets thermo-physiques comme les transformations de phases et les chaleurs latentes de transformation ; des conditions aux limites, telles

que les coefficients de transfert qui dépendent de la pression de contact. Le présent article se focalise sur une particularité de la modélisation des effets thermomécaniques qui concerne la plasticité de transformation. Les preuves expérimentales de cet effet sur une nuance 22MnB5 pour des cycles complexes de température sont présentées. Des études de sensibilité par simulation révèlent l'impact de la plasticité de transformation sur les résultats du durcissement partiel sous presse.

HTM 68 (2013) 4 p. 171-177

TREMPE CONTRÔLÉE DE PIÈCES EN ALUMINIUM PAR TREMPE AU BROUILLARD.

(KONTROLLIERTE ABSCHRECKUNG VON ALUMINIUMBAUTEILEN DURCH SPRÜHKÜHLEN).

N. Hornig, A. Rose, U. Fritsching, A. von Hehl (Texte en allemand).

Lors du traitement d'alliages d'aluminium pouvant être durcis par vieillissement, les propriétés mécaniques et les déformations peuvent être fortement influencées par les paramètres du procédé de trempe. Pour obtenir la résistance requise, un refroidissement efficace après mise en solution est nécessaire. Pour éviter les déformations, une distribution homogène de l'intensité du refroidissement doit être également réalisée. Le refroidissement contrôlé des pièces lors d'un traitement peut être réalisé en utilisant des systèmes de vaporisation modulables. Les conditions souhaitables de transfert thermique sont réalisées en ajustant les débits des vaporisations en localisation et en temps, sur la base de simulations du procédé. Par l'utilisation systèmes de vaporisation, il est possible d'adapter l'intensité du refroidissement à la géométrie de la pièce et à la sensibilité au refroidissement de l'alliage, ce qui permet un bon contrôle des propriétés mécaniques et des déformations après traitement thermique. Un dispositif de refroidissement avec buses de vaporisations a été intégré pour le traitement de pièces ouvrées et coulées. Les résultats des propriétés mécaniques en relation avec les paramètres adéquats du refroidissement sur des échantillons cylindriques sont discutés, ces résultats seront transférés et adaptés pour les conditions de traitement de pièces asymétriques.

HTM 68 (2013) 4 p. 179-187

STABILITE DU GRAIN AUSTENITIQUE DANS LES ACIERS OBTENUS PAR METALLURGIE DES POUDRES AUX HAUTES TEMPERATURES DE FRITTAGE OU DE TRAITEMENT.

(AUSTENIKORNSTABILITÄT IN PULVERMETALLURGISCHEN STÄHLEN BEI HOHEN SINTER- UND WÄRMEBEHANDLUNGSTEMPERATUREN).

M. Dlapka, C. Gierl-Mayer, S. Strobl, M.-C. Huemer, H. Danninger (Texte en allemand).

Le grain austénitique est un paramètre critique du traitement thermique des aciers. La surchauffe conduit à un grossissement des grains qui a pour résultat une baisse des propriétés mécaniques. Comme le frittage est réalisé à des températures de 1120-1180°C, il est difficile d'éviter le grossissement de grain sur les pièces frittées. La présente étude met en évidence, en utilisant une technique spéciale d'attaque thermique, que les aciers frittés résistent à la surchauffe dans une large gamme de porosité/densité. Le grain d'austénite est stabilisé par les porosités. Même

pour les aciers frittés à haute densité avec des niveaux de porosités inférieures à 4%, les pores sont encore suffisants pour empêcher le grossissement du grain austénitique.

HTM 68 (2013) 4 p. 188-195

DURCISSEMENT DE SURFACE SYNCHRONISÉ. (EINSATZHÄRTEN IM FERTIGUNGSTAKT).

V. Heuer, K. Löser, G. Schmitt, K. Ritter (Texte en allemand).

De nombreux engrenages nécessitent un durcissement superficiel pour faire face au cahier des charges qui sont imposés. Très souvent l'atelier traitement thermique est physiquement séparé de l'atelier d'usinage et ceci entraîne des coûts de logistique. La technique de cémentation basse pression et la trempe au gaz sous forte pression permettent de réaliser le traitement thermique dans l'atelier d'usinage. Dans le but d'intégrer totalement le traitement thermique en ligne de fabrication un nouveau module de traitement a été développé avec pour objectif le traitement à l'unité des pièces. En provenance de l'usinage doux, les pièces sont prise une à une et sont traitées pendant un temps correspondant à celui de l'usinage doux (traitement synchronisé) puis orientées, toujours une à une, vers les machines d'usinage dur. L'article présente les innovations et aménagements nécessaires à la mise en oeuvre de cette technologie pour les matériaux, procédés et équipements. La qualité obtenue en regard de la dureté à cœur, l'homogénéité de cémentation et les déformations sont décrites pour plusieurs applications.

HTM 68 (2013) 3 p. 113-123

NITRURATION IONIQUE DES ACIERS PAR PLASMA À ÉCRAN ACTIF.

(KONTROLLIERTES PLASMANITRIEREN VON STÄHLEN MIT EINEM AKTIVGITTER).

K. Börner, H.-J. Spies, I. Burlacov, H. Biermann. (Texte en allemand).

La nitruration avec un écran actif est une innovation qui vient compléter les technologies plasmas déjà largement utilisées dans l'industrie. En agissant sur de multiples paramètres, il est possible de modifier la nature des nitrures superficiels dans de larges limites et de générer des couches avec des structures et des propriétés définies. Les paramètres importants pour le procédé incluent la composition des gaz et le contrôle du débit des espèces actives par le biais de la polarisation. L'influence du carbone dans les mélanges gazeux doit être l'objet d'une attention particulière. Une variation du rapport $\text{CO}_2 : \text{H}_2$ dans le procédé permet de passer d'un plasma nitrocarburant à un plasma oxy-nitruant. Une recherche concernant les mécanismes de transfert de masse dans une installation industrielle à écran actif, montre que le mécanisme de « sputtering » puis condensation ne joue pas de rôle pour le transfert de l'azote. En revanche, il y a des indices de chimisorption lors de la formation des couches. De petites additions de méthane au mélange gazeux conduisent à une activation du processus de nitruration, sans utilisation de la polarisation

HTM 68 (2013) 3 p. 124-132

CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE ET SIMULATION NUMÉRIQUE D'UN PROCÉDÉ D'ÉTRAGE ET DU POTENTIEL DE DÉFORMATION ASSOCIÉ. (EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION AND SIMULATION OF A WIRE DRAWING PROCESS AND RELATED DISTORTION POTENTIALS).

A. da Silva Rocha, R. M. Nunes, T. F. de Souza, C. A. T. Soares, S. Haenisch, A. E. Tekkaya, T. Hirsch (Texte en Anglais).

Pour cette étude un plan d'expérience a été utilisé afin de relier les déformations obtenues en fabrication avec les paramètres du procédé. Le procédé de fabrication consiste, pour des barres cylindriques en acier AISI 1045, en un redressage préalable, un étirage à froid et un durcissement par induction. A chaque étape de fabrication, une caractérisation soignée du matériau a été réalisée incluant les variations dimensionnelles et les contraintes résiduelles. Les variables étudiées comprenaient le procédé d'étrage avec deux angles différents d'étrage ; un traitement de relaxation des contraintes qui a été appliqué sur une partie des échantillons ; et, le traitement par induction qui a été réalisé avec deux niveaux d'épaisseur de traitement. La simulation numérique du procédé a également été utilisée comme outil afin de clarifier les possibilités et les limites de ce type d'analyse qui dépendent des données prises en compte. Le paramètre ayant l'effet principal sur les déformations des barres étirées est l'étrage lui-même. Le redressage préalable conduit à des pièces qui ne sont pas circulaires et il y a de fortes différences dimensionnelles dans les directions axiales et radiales, ainsi qu'un état inhomogène des contraintes résiduelles qui probablement contribue à la déformation après étirage. La minimisation des contraintes résiduelle après travail à froid réduit le niveau moyen de déformation des échantillons examinés. Une profondeur de traitement par induction plus importante accroît la déformation. La comparaison avec la simulation conduit au résultat que les différences observées fournissent la preuve que le matériau avant étirage n'est ni homogène en circularité ni exempt de contraintes résiduelles comme cela est supposé dans les simulations actuellement.

HTM 68 (2013) 3 p. 135–141

USURE EN FROTTEMENT À SEC D'ACIERS DE TRAITEMENT THERMIQUE FRITTÉS.

(TROCKENLAUF-GLEITVERSCHLEIß VON SINTERGEHÄRTETEN STÄHLEN).

E. Klammer, M. Dlapka, C. Gierl-Mayer, H. Danninger. (Texte en Anglais).

Dans les boîtes de vitesses moderne, les aciers faiblement alliés frittés sont de plus en plus utilisés. Dans ces systèmes qui sont normalement lubrifiés, le lubrifiant peut faire défaut. Même avec ce scénario du pire, la boîte doit fonctionner un certain temps. Dans la présente étude, la résistance à l'usure de quatre nuances d'acier différentes, faiblement alliées, obtenues par métallurgie des poudres, a été étudiée. Les propriétés de frottement étaient évaluées grâce à un essai de type pion-disque sans lubrification. Le disque était en acier à roulement 100Cr6 et les distances d'essai pouvaient atteindre 200Km. Les résultats mettent en évidence qu'avec des charges modérées l'oxydation tribologique est le mécanisme dominant comme l'indique l'analyse des débris. A fortes charges, c'est la délamination qui intervient avec des effets d'adhésion. Dans ces conditions de char-

gement les aciers alliés au Cr Mo ont des caractéristiques supérieures à celles des aciers Ni Cu Mo qui sont communément utilisés pour les pièces frittés

HTM 68 (2013) 3 p. 142–149

FPC (FINE POWDER COATING).

Procédé de création de couches fonctionnelles de métal, de faible épaisseur, appliqué à l'aide d'une buse plasma fine robotisée recevant des poudres métalliques pour revêtir des matériaux thermosensibles. Les revêtements s'appliquent sur des métaux et matières plastiques pour des applications anticorrosion, tribologiques, de brasabilité ou d'amélioration de la thermoconductivité. Un exemple d'application d'un revêtement nickel-diamant sur la face frontale d'une roue à chaîne est montré. Procédé proposé par la Sté Plasmatreat.

Galvano Organo N° 823 Oct. 2013 page 46

INFLUENCE DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR L'USINABILITÉ EN TAILLAGE D'ARBRES EN 27MnCr5 FORGÉS À FROID. ÉTUDE COLLABORATIVE PILOTÉE PAR LA COMMISSION FORGE DU CETIM.

L'influence sur le taillage, de différentes gammes de recuit et structures en résultant a été regardée : recuit isotherme ou recuit de globulisation avant forgeage, absence de traitement, recuit isotherme ou détente après forgeage. Le recuit isotherme est dans tous les cas favorable, lorsque l'état de départ avant forgeage est l'état globulisé le recuit isotherme après forgeage est indispensable. Les effets de la morphologie de la structure est discuté.

La Forge N°53 pages 4 à 10

ZOOM SUR LES POUDRES MÉTALLIQUES DÉDIÉES À LA FABRICATION ADDITIVE.

A. RIOU (ERASTEEL).

Rappel des principes de la fabrication additive et des ses applications. Les poudres de taille comprise entre 10 et 45 µm sont produites par atomisation au gaz (azote ou argon) ou sous vide. Des exemples sont montrés et la techniques est positionnée à côté des autres technologies utilisant des poudres.

La Forge N° 54 pages 12 à 14

RECHARGEMENT ET FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE PAR FUSION LASER : LE TEMPS DE L'INDUSTRIALISATION

F. MACHI (IREPA LASER).

Description du procédé développé et breveté par IREPA LASER (buse coaxiale) L'article décrit les caractéristiques générales des dépôts laser connus sous le nom de laser cladding ou CLAD (Construction Laser Additive Directe) il s'applique à la métallurgie additive. L'article se poursuit par un constat et une réflexion marketing en termes d'applications et de développement. Le positionnement des différents acteurs industriels est présenté.

La Forge N° 54 pages 15 à 22

UNE JOURNÉE DÉDIÉE A LA TECHNOLOGIE HIP.

M. Ducos

Compte rendu de la journée du 18 avril organisée par la SF2M et le GFC. La journée a été consacrée aux différentes technologies de la métallurgie des poudres et notamment ses applications pour la fabrication de pièces complexes en near-net-shape par encapsulage.

Traitements et Matériaux N°422 pages 20 à 21

LES ULTRASONS DE PUISSANCE POUR LE NETTOYAGE.

J.Y Hihn, R. Viennet UTINAM Franche-Comté

La nature des ondes ultrasonores ainsi que leur principe d'utilisation en milieu liquide pour le nettoyage sont rappelés. Le choix des paramètres et les conditions de conduite de l'installation est développé. Les paramètres importants sont la maîtrise de la cavitation et la distribution de l'intensité acoustique. L'UTINAM a développé des outils permettant de construire des pilotes de nettoyage adaptés à la forme des produits à nettoyer.

Traitements et Matériaux N°422 pages 22 à 24

IMPACT DE LA STRUCTURE MÉTALLURGIQUE SUR LE CHARGEMENT ET LA DésORPTION NATURELLE DE L'HYDROGÈNE.

A. Fleurentin (Cetim), J. Creus et X. Feugas (LaSIE).

L'étude porte sur l'influence de la structure sur le chargement et déchargement en hydrogène d'un acier 35Cr4 trempé et revenu à 1250 MPa, présentant une structure martensitique (trempé revenu 450°C) ou bainito-martensitique (obtenue par trempé étagé aux sels) dont les morphologies sont décrites avec un focus particulier sur les densités de dislocations inter-lattes.

Le chargement en hydrogène est réalisé à l'aide d'une cellule électrochimique en milieu d'acide sulfurique. Les structures bainito-martensitiques ont une solubilité plus importante en hydrogène liée à la densité de dislocations plus importantes contenues dans la martensite, les temps d'incubation et déchargement sont plus lents pour la martensite. La conséquence du flux d'hydrogène important dans le matériau interagit avec les défauts (lacunes et dislocations) et les champs élastiques de la structure avec des conséquences sur les propriétés mécaniques qui restent à étudier.

Traitements et Matériaux N°421 pages 25 à 29.

QUELLES POUDRES POUR LA PROJECTION THERMIQUE PAR GAZ FROID ?

M. Jeandin, G. Rolland et al. (Mines ParisTech).

La projection dynamique par gaz froid (cold spray) est incontestablement l'un des procédés de dépôt les plus innovants. Pour atteindre sa pleine maturité industrielle, il lui manque cependant, encore des poudres qui lui soient propres. Cet article essaie de les définir.

Après une réflexion sur les mécanismes associés à la projection sous gaz froid, les auteurs proposent une approche globale selon les produits à déposer (taille et régularité des poudres) et une approche locale (taille et forme de la particule). L'influence des caractéristiques métallurgiques de la poudre est prise en compte sur les comportements mécaniques des dépôts en relation avec les recristallisations et les structures obtenues. L'influence de l'oxydation de la poudre est un paramètre important. L'article se termine par

une proposition de définition d'une poudre idéale.

Traitements et Matériaux N°422 pages 31 à 40

ADAPTER LE PROCÉDÉ DE NETTOYAGE AU TYPE DE CONTAMINATION.

D. Schulz Dürr Ecoclean GmbH.

Le texte passe en revue les différents procédés de nettoyage avec leurs avantages et domaines d'application. Nettoyage chimique par voie humide, solution quasi universelle. Et nettoyage à base de solvants. Les besoins de protection temporaires à l'issue du nettoyage sont mentionnés et l'efficacité de l'utilisation de l'énergie et des ressources prise en compte.

Traitements et Matériaux N°422 pages 41 à 42

SYNTHÈSE, PURIFICATION ET DENSIFICATION DE POUDRES PAR PLASMA INDUIT : DE LA NANOSTRUCTURE À L'ÉCHELLE MICROMÉTRIQUE.

R. Vert, R. Pontone et al. (Tekna Plasma).

La génération d'un plasma par l'intermédiaire d'un champ électromagnétique permet de générer un écoulement gazeux partiellement ionisé de très haute température et de s'affranchir des éventuels risques de contamination liés à l'usure de pièces (électrodes par exemple). La maîtrise du plasma et de ses propriétés ouvre des perspectives sur le contrôle des réactions chimiques et de la fusion/vaporisation de matériaux réfractaires. La torche à plasma de technologie Tekna est décrite. Les applications industrielles sont dans les domaines de la synthèse de nanoparticules et la sphéroïdisation, densification et purification de poudres micrométriques.

Traitements et Matériaux N°422 pages 43 à 49.

QUE SERAIT UN MONDE SANS MATÉRIAUX ?

M. Jeandin (Mines ParisTech).

Conférence donnée à la « Matinale Matériaux » au MAC/VAL de Vitry sur Seine. Réflexion philosophique sur la place des matériaux dans le monde scientifique, artistique et technique.

Traitements et Matériaux N°423 pages 13 à 15

RÉUSSIR SON AUDIT NADCAP.

Interview de J. Donis auditeur PRI Nadcap

Traitements et Matériaux N°423 page 19

MOYENS MIS EN ŒUVRE POUR LA CARACTÉRISATION DES INCLUSIONS DANS LES ACIERS.

E. Hénault (Creas Ascométal).

Rédaction de la communication présentée lors de la journée A3TS Nord-Est résumé dans A3TS Sciences et Technique de juillet 2013.

Traitements et Matériaux N°423 pages 20 à 24

MAÎTRISE DES CARACTÉRISTIQUES DIMENSIONNELLES DES COMPOSANTS DE TRAIN DE ROULEMENT.

D. Gerardin Caterpillar France (communication présentée à A3TS Grenoble 2012)

Application des plans Taguchi au suivi et à l'optimisation des paramètres de traitement thermique des douilles de

maillons de chaînes d'engins de TP qui subissent un adoucissement par revenu par induction des extrémités. Après une étude de « robustesse » du procédé, les paramètres critiques sont identifiés et leurs valeurs optimales déterminées. La méthode s'applique au développement de nouveaux produits et procédés.

Traitements et Matériaux N°423 pages 25 à 28

DÉTERMINATION DES INCERTITUDES DE MESURE

E. Laffineur (Marle Nogent).

Rédaction de la communication présentée lors de la journée A3TS Nord-Est résumé dans A3TS Sciences et Technique de juillet 2013.

Traitements et Matériaux N°423 pages 29 à 39

LES ACIERS DE CONSTRUCTION SONT-ILS TOUS ÉGAUX FACE À LA FRAGILISATION PAR L'HYDROGÈNE ?

A. Fleurentin (CETIM), J. Favergeon (UTC).

Etude de la sensibilisation à la fragilisation par l'hydrogène à partir d'essais de traction lente de vis M7, de nuances d'aciers trempés et revenu : 37Cr4, 36NiCrMo16, acier au Cr-Mo. Après chargement en hydrogène par voie chimique selon NF A05-303 et dosage par spectroscopie de désorption thermique, différents niveaux de résistance ont été comparés, 1225, 1437, 1490 MPa. Après discussion des résultats obtenus l'étude conclut que selon leur composition les aciers sont plus ou moins sensible à la fragilisation par l'hydrogène selon leur niveau de résistance. L'acier 36NiCrMo16 se classe mieux, et la nuance au Cr-Mo (non définie) a un meilleur comportement que la nuance 37Cr4. Il est possible de tracer des courbes de transition ductile-fragile en fonction du taux d'hydrogène contenu dans l'acier.

Traitements et Matériaux N°423 pages 40 à 45

RQP1 : BONNES PRATIQUES ET MAÎTRISE DU PROCESSUS DE TRAITEMENT THERMIQUE POUR L'AUTOMOBILE.

P. F Cardey (CETIM).

Le RQP1 (Recommandations Qualité Processus) est un référentiel développé par les professionnels sous-traitants et donneurs d'ordre pour proposer une alternative au référentiel CQI-9 imposé par l'industrie automobile américaine. L'article décrit l'organisation du référentiel et le système de cotation pour les ateliers de traitement thermique. Quelques retours d'expérience sont donnés et les perspectives de normalisation envisagées.

Traitements et Matériaux N°423 pages 46 à 48

LES SYSTEMES BARRIÈRES THERMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES POUR TURBINES TERRESTRES OU AÉRONAUTIQUES.

G. Bertrand Cirimat Toulouse, O. Lavigne Onera.

Les barrières thermiques TBC sont des systèmes multicouches déposées sur des composants métalliques refroidis des parties chaudes des turbines. Elles sont constituées d'une couche de céramique poreuse ($ZrO_2 + Y_2O_3$) déposée sur une couche de liaison métallique $MCrAlY$ ou $\beta Ni(Pt) Al$. Les barrières environnementales ont été développées

pour la protection des pièces en composite à matrice céramique, elles sont constituées d'une couche externe à base d'hafnium dopée vers une couche riche en mulite et silicates de terres rares. Les mécanismes de renforcement comportemental sont décrits. Le procédé d'élaboration sont les plasmas spray APS ou l'EB-PVD. En fonctionnement ces couches se dégradent par création de CMAS (oxydes de calcium, magnésium, aluminium et silicium) contenant des éléments métalliques Ti, Fe ou Ni provenant du moteur. Le point de fusion est alors proche des températures de fonctionnement (1200°C). Les essais de simulation doivent intégrer ces phénomènes, des méthodes de projection par HVOF de CMAS sont utilisées, ils aboutissent à la recherche de solution pour retarder le phénomène de dégradation. Des procédés alternatifs sont évoqués, tels que les procédés sol-gel pour la réparation de couches dégradées localement, le frittage flash (Spark plasma sintering SPS), la projection plasma de suspensions ou de solutions.

Traitements et Matériaux N°424 pages 21 à 25

NITROCARBURATION DANS DES MÉLANGES DE GAZ À BASE D'AMMONIAC ET D'HYDROCARBURE.

H. Pedersen, T. I Christiansen, M.A.I Somers (Technical University of Denmark).

L'article examine la possibilité de réaliser une nitrocarburation dans des mélanges de gaz à base d'ammoniac-acétylène-hydrogène et d'ammoniac-propène-hydrogène, où l'hydrocarbure insaturé est la source de carbone au cours de la nitrocarburation. La nitrocarburation du fer pur (ARMCO) a été étudiée dans une thermo-balance pour un cycle à 580°C. Il est démontré que l'usage d'un gaz hydrocarboné insaturé est une alternative possible aux méthodes traditionnelles. La morphologie et la composition de la couche de combinaison peuvent être contrôlées de manière précise en ajustant l'atmosphère à partir des contrôles de KN et KC. Même de minimes quantités d'acétylène peuvent apporter une activité de carburation suffisante pour le procédé de nitrocarburation.

Traitements et Matériaux N°424 pages 26 à 30

EXPERIENCES PRATIQUES RELATIVES AU RÉGLAGE ET À LA COMMANDE DES PROCESSUS DE NITRURATION GAZEUSE.

S. Heineck (Stange Electronik).

L'auteur décrit les différents capteurs utilisés en nitrocarburation et proposé par la Sté Stange. Capteur H_2 constitué d'un pont de Wheatston à 4 résistances, 2 dans en parallèles dans le gaz à analyser et deux autres dans un gaz de calibration. Les cellules de mesure sont traversées par le gaz à mesurer, on mesure la conductibilité thermique du gaz à la température considérée. Sonde Q à oxygène conçue spécialement pour la nitruration. Le signal de sortie correspond au quotient des pressions partielles (H_2O / H_2) ou ($H_2O + CO_2 / CO + H_2$). Capteur O_2 : dotée d'une pompe à oxygène le gaz et d'une cellule de zirconium chauffée et modifiée, le but est d'avoir une meilleure précision qu'avec la sonde Q qui peut fournir des valeurs très écartées des valeurs réelles dans le réacteur. Le choix des capteurs est discuté notamment dans le cas d'oxynitruration et nitruration post oxydée. La gestion complète du processus et des analyses par pilotage des valeurs de KN et KO et KC est décrite.

Traitements et Matériaux N°424 pages 33 à 38

UNE APPROCHE ASSOCIANT EXPÉRIMENTATION ET MODÉLISATION THERMOCINÉTIQUE POUR AMÉLIORER LES PERFORMANCES DES TIGES DE FORAGE.

S. Mauries & al. (Vallourec).

Les tiges de forage nécessitent l'utilisation d'aciers présentant des capacités en tension très élevées ($R_{p0,2} > 165$ KSI, 1155 MPa) tout en conservant de bonnes propriétés de résilience. Le développement de tels aciers passe par la compréhension des mécanismes qui lient les paramètres microstructuraux aux propriétés mécaniques. Une approche méthodique associant la caractérisation des précipitations selon la composition chimique et le traitement thermique à l'aide d'une méthode de dissolution sélective couplée à la diffraction X et une simulation thermocinétique (MatCalc) est développée par Vallourec. L'influence des éléments d'alliage sur un acier de type 35CrMo4 a été regardé sur l'évolution au revenu des propriétés mécaniques et sur les microstructures et tailles des grains (indice 12-13). L'apport de nickel présent en solution solide n'a pas d'effet, les éléments carburigènes ne provoquant pas de précipitation supplémentaire, dégrade la résilience, le molybdène reste en solution jusqu'à 650°C avant de se substituer au fer dans les carbures. Les mécanismes prépondérants sont : solution solide, dislocations et précipitation.

Traitements et Matériaux N°424 pages 39 à 43

DE L'AUDIT SYSTÈMES À L'AUDIT MÉTIER.

PSA, Renault, Faurecia, Bodycote

En 2006, les constructeurs automobiles américains sous couvert de l'AIAG éditent le CQI-9 s'adressant spécifiquement au processus de traitement thermique. L'article fait le tour d'horizon des évolutions et utilisations de ce référentiel et du référentiel RQP1 développé en France, avec le point de vue des utilisateurs, les coûts induits et le parallèle entre les deux référentiels.

Traitements et Matériaux N°424 pages 44 à 49

TRAITEMENTS THERMIQUES DANS LA MASSE DES ACIERS À OUTILS.

R. Lévêque Edition M1134v2 dans Les Techniques de l'Ingénieur (27 pages)

TRAITEMENTS SUPERFICIELS DES ACIERS À OUTILS.

R. Lévêque Edition M1135v2 dans Les Techniques de l'Ingénieur (25 pages)

COMPARAISON ENTRE LES DÉFORMATIONS REPRÉSENTATIVES DE L'INDENTATION VICKERS ET DE L'INDENTATION SPHÉRIQUE.

O. Bartier & al (LGCGM EA3913, INSA de Rennes).

Le concept de déformation représentative est souvent employé lors de la détermination de la loi d'érouissage d'un matériau par indentation. Une nouvelle méthodologie de détermination de la déformation représentative en indentation Vickers et sphérique est présentée dans cet article. Les résultats obtenus à partir de cette méthodologie montrent qu'il n'existe pas de constante universelle de déformation représentative indépendante des paramètres mécaniques des matériaux indentés par des pénétrateurs Vickers et sphérique. Il est montré également que la déformation

représentative de l'indentation Vickers ou sphérique est beaucoup plus faible lorsque celle-ci est obtenue à partir de courbe d'indentation, F-h, plutôt qu'à partir de la relation entre l'effort appliqué et le rayon de contact, F-a. En choisissant une même déformation représentative en indentation sphérique et en indentation Vickers, les résultats montrent que le même facteur de confinement est obtenu. Ce résultat montre qu'il est possible de trouver une analogie parfaite entre ces deux types d'indentation. Les valeurs de déformations représentatives obtenues montrent que la prise en compte simultanée des relations F-a et F-h permet a priori de caractériser la loi d'érouissage à deux paramètres inconnus d'un matériau indenté. Dans le cas de l'indentation sphérique, l'identification d'une loi d'érouissage d'un matériau à partir de F-a et de F-h doit amener à une détermination plus précise de la loi d'érouissage $\sigma-\epsilon$.

Matériaux & Techniques Volume 101, Numéro 3, 2013

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE TRIBOFILMS FORMÉS DANS UN CONTACT FROTTANT Cu / DLC / ACIER.

S. Bec & al (École Centrale de Lyon, Ecully, France).

Les couches minces Diamond-Like Carbon (DLC) permettent d'obtenir des frottements et usures faibles dans les contacts secs. Il est aussi possible de contrôler les propriétés électriques du contact en réalisant des couches nanocomposites métal/DLC. Dans ce travail, on s'intéresse à la caractérisation mécanique des surfaces en contact à l'issue d'essais de frottement linéaires alternatifs entre un plan recouvert d'une couche nanocomposite Cu/DLC et une bille en acier. En particulier, dans certaines conditions, ces essais conduisent à la formation d'un tribofilm sur les surfaces, dû aux échanges de matière entre les surfaces en contact lors du frottement. L'observation des surfaces frottées permet de corrélérer l'évolution du coefficient de frottement et de la résistance électrique de contact à la formation ou non d'un tribofilm adhérent sur la bille. Lorsqu'un tribofilm est formé, celui-ci est conducteur, et la couche mince ne subit qu'une usure progressive. Néanmoins, le coefficient de frottement évolue au cours de l'essai. Afin de mieux comprendre cette évolution, les propriétés mécaniques ont été mesurées par nanoindentation dans et hors des traces d'usure sur le plan et sur la bille, pour des essais réalisés à différents nombres de cycles. Les propriétés élastoplastiques du tribofilm se révèlent être différentes de celles des matériaux initiaux et semblent pouvoir être corrélées à l'évolution du coefficient de frottement.

Matériaux & Techniques Volume 101, Numéro 3, 2013

INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA RUGOSITÉ DE SURFACES SABLÉES SUR LA MESURE DE DURETÉ-PAR NANOINDENTATION.

Hsin Shen Ho et al. (CETIM).

Les essais de nanoindentation sont souvent utilisés pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux en proche surface. Cependant, cette technique manque de reproductibilité : une même réponse mécanique est difficilement obtenue par les essais de nanoindentation sur différentes zones de la surface d'un même échantillon. L'une des principales causes est la mauvaise détermination du point de référence pour le calcul de la profondeur indentée. Dans cette étude, une méthodologie palliant ce problème est appliquée à des échantillons d'alliage d'aluminium (AU4G) sablés avec différentes conditions. Les résultats présentés ici

confirment la robustesse de la méthode. Ils montrent qu'il est difficile d'obtenir une même réponse mécanique lorsque les échantillons sont rugueux et que la détermination du point de référence pour la profondeur d'indentation dépend fortement de la rugosité de la surface des échantillons sablés. La meilleure corrélation entre l'écart-type de ce point de référence et le paramètre de rugosité R_q est obtenue pour une longueur d'évaluation de 15 μm , c'est-à-dire à l'échelle des empreintes d'indentation.

Matériaux & Techniques Volume 101, Numéro 3, 2013

INFLUENCE DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES ET DE LA TEXTURE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE FILMS MINCES DE Cr ELABORÉS PAR PULVÉRISATION CATHODIQUE RF. RELATION STRUCTURE-DURETÉ DE FILMS DE Cr.

A. Le Priol (CNRS ENSAM Poitiers).

Le chrome est souvent utilisé comme sous-couche pour permettre ou améliorer l'adhésion. Des analyses de contraintes résiduelles et de la microstructure des films minces de chrome élaborés par pulvérisation cathodique RF ont été réalisées afin de définir les conditions d'élaboration optimums pour incorporer celui-ci dans une métallisation existante. Une transition des contraintes résiduelles de compression tension est observée, suivie d'une relaxation lorsque la pression de travail est augmentée. Une évolution de la composante de texture du chrome apparaît également. L'apparition de fortes contraintes de compression et le développement de la texture de fibre $\{110\}$ liés au bombardement très énergétique à faible pression engendrent un film mince de Cr possédant une dureté élevée. L'augmentation de la pression de travail diminuant l'énergie des atomes pulvérisés arrivant sur la surface de l'échantillon engendre d'une part une diminution des contraintes de compression et d'autre part une évolution de la composante de texture. Un film mince de chrome possédant un état de contrainte en tension et une texture de fibre $\{111\}$ présente une dureté relativement faible.

Matériaux & Techniques Volume 101, Numéro 3, 2013

ÉTUDE DE TRAITEMENTS MÉCANIQUES DES SURFACES REPOSANT SUR DES SOLLICITATIONS DE RAYURE (SUPERFINITION, POLISSAGE, GALETAGE)

G. Kermouche École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne,

L'objectif de ce travail est d'étudier le lien entre les contraintes résiduelles et les procédés de traitement mécanique des surfaces reposant sur des sollicitations de rayure (galetage, super finition, polissage, ...). On présente tout d'abord une étude numérique qui a permis de dégager des tendances fortes sur la relation entre rayure et contraintes résiduelles. On applique ensuite ces résultats pour interpréter les conséquences induites en termes de contraintes résiduelles par différents procédés. Notamment, on observe que le paramètre prépondérant dans le procédé de galetage est la force appliquée; l'avance et la vitesse n'ayant un effet que dans des cas très particuliers – le toilage induit des contraintes de compression en extrême surface d'autant plus forte que la taille des grains abrasifs et la force appliquée par le galet sont importants – le polissage par flux d'abrasifs peut aussi induire des compressions résiduelles selon le niveau de pression dans le fluide. Ces résultats

sont en excellent accord avec l'approche locale développée dans la première partie du papier. On conclut sur l'intérêt de ces travaux pour optimiser ces différents procédés, dont certains sont originellement développés pour diminuer la rugosité, afin d'obtenir des compressions résiduelles en extrême surface. Ces procédés deviennent ainsi des procédés de traitements mécaniques des surfaces au même titre que le procédé de grenailage.

Matériaux & Techniques Volume 101, Numéro 3, 2013

SIMULATION MICROSTRUCTURALE DE LA PROPAGATION DE FISSURES COURTES DANS UN CONTACT DE FRETTEING EN TA6V.

H. Proudhon et al (MINES ParisTech).

L'amorçage précoce de fissures de fretting et la micro-propagation qui s'en suit est un phénomène important dans l'industrie aéronautique mais reste encore mal compris. Des critères d'amorçage existent pour estimer la durée de vie correspondante mais ne sont guère performants car ils nécessitent de moyenniser les contraintes pour atténuer l'effet des forts gradients sous le contact. En réalité, une grande partie de cette durée de vie est consommée par la propagation d'une petite fissure dans les tous premiers grains. Cette phase, où la microstructure du matériau joue un rôle important (orientation des grains, franchissement des joints de grains par la fissure), n'est en général jamais modélisée. Dans ce travail, on présente un nouveau modèle de propagation destiné à simuler cette phase de propagation à l'issue de laquelle les modèles classiques de propagation (fonctions de poids, MELR) peuvent être utilisés pour prédire la rupture de l'éprouvette. Le modèle utilise massivement la méthode des éléments finis couplée à une loi de comportement de plasticité cristalline. En introduisant explicitement la microstructure et la fissure dans le contact, on est capable d'estimer le nombre de cycles pour propager une fissure de 0 à 150 micromètres. Ce modèle est aussi très utile pour étudier plus finement des phénomènes tels que le franchissement de la première barrière microstructurale par la fissure sous l'effet du contact cyclique.

Matériaux & Techniques. Volume 101, Numéro 2, 2013

CARACTÉRISATION MICROSTRUCTURALE DE L'AUSTÉNITE EXPANSÉE FORMÉE PAR NITRURATION DE L'ACIER AISI 316L.

(MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE EXPANDED AUSTENITE FORMED ON THE PLASMA NITRIDED AISI 316 L STEEL).

M. Keddou et al. (USTHB, El-Alia, Bab-Ezzouar, Alger, Algérie).

Dans ce travail, l'acier 316 L a été nitruré ioniquement à 420 °C durant des temps allant de 0,5 à 8 h dans un mélange de gaz (90 % N_2 -10 % H_2). Les observations par microscopie optique (MO) ont révélé la présence de l'austénite expansée γN avec une épaisseur moyenne comprise entre 2,8 et 9,7 μm .

La cinétique de croissance de la couche γN a été également étudiée. Les analyses DRX et SDL ont été utilisées pour caractériser expérimentalement la couche γN .

Un modèle mécanique basé sur les résultats de la DRX a été appliqué pour estimer les contraintes de compression dans la couche γN et les déformations induites par la diffusion de l'azote. Les valeurs estimées des contraintes de compression (en valeurs absolues) sont comprises entre

2,10 et 3,70 GPa avec des valeurs de déformations entre 6,3 et 7,94 %. Sur la base des résultats de DRX, on a trouvé que l'austénite expansée peut dissoudre jusqu'à 32 at.% en azote.

Matériaux & Techniques. Volume 101, Numéro 2, 2013

COMPUTER MODELING, INDUCTION HEAT TREATING ARE HERE TO STAY.

G. Doyon, Dr. V. Rudnev, and C. Russell

Exemples de modélisation de trempe d'un arbre fusée à plateau, d'un rail avant forgeage et d'une pièce complexe avec emploi d'un concentrateur de champs. (texte téléchargeable sur le site de la revue).

Industrial Heating magazine sept. 2013

MÉTHODES D'AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ D'ISOLATION DES FOURS SOUS VIDE.

(METHODS OF IMPROVING VACUUM FURNACE INSULATION EFFICIENCIES).

Reâl J. Fradette

Le remplacement des feutres graphite PAN-type (Polyacrylonitrile) des chambres chaudes par un produit constitué de couches de feutre de graphite de type « Rayon carbon », développé par Solar Manufacturing permet de réduire les pertes thermiques par 65 à 70%.

Industrial Heating magazine sept. 2013

TREMPE AU GAZ ET TREMPE DANS UN FLUIDE : UNE COMPARAISON DIRECTE DE LA TREMPABILITÉ JOMINY.

(GAS VS. LIQUID QUENCHING: A DIRECT COMPARISON IN JOMINY HARDENABILITY).

R. Hill

Solar Manufacturing a développé un essai de trempabilité de type Jominy réalisé dans une enceinte sous vide recevant un refroidissement gaz. La comparaison des courbes Jominy d'aciers 4140 et 4340 trempés à l'eau montre qu'une vitesse d'arrivée du gaz de 200 m/h correspondant à une pression de 20 bar azote dans un four sous vide qui permet sur l'acier 4340 de se rapprocher de cette trempe à l'eau. Le dispositif et sa conception sont discutés.

Industrial Heating magazine nov. 2013

COMMERCIALISATION DU PROCÉDÉ DE TREMPE INTENSIVE.

(INTENSIVE QUENCHING PROCESS COMMERCIALIZATION).

M. Aronov, N. Kobasko, J. Powell, and P. Sampson (IQ Technologies, In).

La trempe intensive (IQ process) développée dans les années 60 en Ukraine et 2000 sur le continent américain, est un procédé de trempe à l'eau avec une très forte agitation uniforme interrompue au moment où l'on estime qu'une couche superficielle est suffisamment refroidie et mise en compression maximum (détermination à l'aide d'un logiciel). Le reste du refroidissement s'effectue alors à l'air et la chaleur restituée par le cœur non refroidi participe au revenu de la couche trempée. Différentes installations industrielles sont présentées. Les déformations sont moindres et les performances obtenues supérieures sur aciers au carbone à faible trempabilité ou sur pièces cémentées qu'avec les méthodes traditionnelles de trempe eau, huile ou aqueuse à base de polymères.

Industrial Heating magazine oct.. 2013

POTENTIEL D'ÉCONOMIE D'ÉNERGIE DANS LES FOURS DE BRASAGE À VIDE POUSSÉE UTILISANT LES POMPES À DIFFUSION.

(ENERGY-SAVING POTENTIAL IN HIGH-VACUUM BRAZING FURNACES USING DIFFUSION PUMPS).

H.- W. Schweizer and U. Zoellig

(Oerlikon Leybold Vacuum USA, Inc).

Industrial Heating magazine sept.. 2013

AMÉLIORER LA PRODUCTIVITÉ AVEC UN ÉQUIPEMENT DE MICRODURETÉ AUTOMATISÉ.

(IMPROVE PRODUCTIVITY WITH AUTOMATED MICRO-HARDNESS TESTING).

R. Wismer (Newage Testing Instruments).

Présentation d'un microduremètre automatique réalisant des essais Rockwell sous faible charge (1000g) permettant de remplacer les essais Vickers ou Knoop pour la réalisation de filiations de dureté.

Industrial Heating magazine août.. 2013

Comité de rédaction : M. Courteaux, C. Leroux, C. Tournier.



Association de Traitement Thermique et de Traitement de Surface
71 rue La Fayette 75009 Paris
Tél. : 01 45 26 22 35 - 01 45 26 22 36 - Fax : 01 45 26 22 61
www.a3ts.org - Email : a3ts@a3ts.org