

## SYNTHESE JOURNEE DU 10-04-2014

La journée consacrée à la thématique « La forge à chaud en 2014, un outil incontournable pour la mise en forme d'alliages performants destinés aux industries de pointe », a rassemblé 110 personnes avec 60% d'industriels, 25% d'universitaires, 10% de représentants des centres techniques et 5% d'institutionnels. Ce fut donc un succès dû au programme proposé dans lequel on peut trouver trois parties bien distinctes et néanmoins complémentaires :

- une première partie bien développée sur le contrôle des microstructures abordé expérimentalement, mais aussi de façon prédictive ; cette partie a été structurée autour d'une conférence introductive sur les études thermomécaniques et microstructurales appliquées à la forge, une autre conférence sur l'évolution prédictive des structures au cours du forgeage, avec des applications industrielles centrées sur le forgeage des aciers spéciaux et des superalliages, ainsi que des alliages d'aluminium, de titane et de zirconium ;
- une seconde partie, centrée sur la prévision du processus de forgeage et consacrée à l'évolution des méthodes numériques et ses applications dans deux domaines : le contrôle des paramètres process dans le but de maîtriser les procédés de forgeage et l'aide à la conception des gammes de forgeage ;
- une troisième partie réservée à l'évolution des outils de forgeage et à leur utilisation comme moyen d'assistance pour la réalisation de produits épais par laminage et de produits de grandes dimensions par métallurgie des poudres.

**1 - Première partie :** Cette première partie relative au contrôle des microstructures abordé expérimentalement et de façon prédictive, a regroupé six conférences dont la conférence introductive et quatre conférences applicatives, la première étant complétée judicieusement par une conférence sur la prédiction de l'évolution des microstructures au cours du forgeage.

La conférence introductive présentée par Christophe DESRAYAUD du centre SMS de l'Ecole des Mines de Saint Etienne a montré pour la forge à chaud la pertinence des études de forgeabilité pour appréhender les évolutions microstructurales liées aux déformations intenses. Ces évolutions microstructurales diffèrent selon l'énergie de défauts d'empilement du matériau déformé : restauration dynamique avec mélange de grains et de sous grains pour les matériaux à forte énergie de défauts d'empilement (alliages d'aluminium), germination croissance à partir des zones voisines des joints de grains pour les matériaux à faible énergie de défauts d'empilement (aciers inoxydables). Pour les matériaux de structure hexagonale compacte, comme les alliages de titane et de zirconium, sièges de transformation de phases, il y a nodularisation des structures au cours du forgeage avec un très net affinage s'il y a forgeage croisé. Les outils utilisés pour étudier et modéliser ces phénomènes (torsion à chaud et modèle de recristallisation continue) ont été présentés. Il est bon de souligner l'apport expérimental pour les techniques de forgeage des essais de torsion à chaud qui produisent commodément de grandes déformations.

La première conférence applicative présentée par Christian DUMONT de la société Aubert et Duval (site des Ancizes) a montré des exemples liés au forgeage et matriçage de pièces en alliage base nickel pour obtenir un compromis entre les différentes propriétés comme la tenue à la fatigue et au fluage. La gamme optimale a été présentée comme l'aboutissement de la simulation des procédés couplée à des modèles de prédiction des microstructures. Ces approches, réservées dans un premier temps au matriçage de lopins, s'étendent maintenant du forgeage au traitement thermique final, avec prédiction des caractéristiques mécaniques et des contraintes résiduelles.

Cette première conférence applicative a été complétée par une conférence sur la prédiction de l'évolution des microstructures au cours du forgeage, appliquée aux alliages base nickel du type IN718. Cette conférence a été présentée par Nathalie BOZZOLO du CEMEF (Sophia Antipolis). Les différents phénomènes métallurgiques tels que l'écrouissage, la restauration, la recristallisation et la croissance de grains en présence de particules intermétalliques susceptibles d'évoluer ont été reproduits par essais de torsion à chaud interrompus à différents niveaux de déformations et associés à des analyses microstructurales quantitatives par EBSD. Un modèle de recristallisation en champ moyen a pu être calibré à partir de telles données pour fournir un outil prédictif des évolutions dynamiques et post dynamiques. Les instabilités locales de microstructure ont pu être décrites par un modèle en champ complet capable de prendre en compte la topologie des particules intermétalliques et une distribution d'énergie stockée variable de grain à grain.

La deuxième conférence applicative, présentée par Ludovic BOURGEON de la société Aubert et Duval (site d'Issoire), a montré des exemples liés au forgeage et matriçage de pièces de grandes dimensions en alliages d'aluminium des familles 2000 et 7000 destinés à l'industrie aéronautique. La conception de telles pièces doit intégrer la problématique des contraintes résiduelles afin que l'usinage se fasse sans déformations. L'état des contraintes est simulé tout au long du process : forgeage libre, matriçage, mise en solution, trempe, revenu et détensionnement après usinage, ce qui implique la connaissance de nombreux paramètres : lois de comportement, coefficients d'échange thermique, coefficients de frottement, taux de déchargement élastique.

La troisième conférence applicative, présentée par Yvon MILLET de la société Timet Europe (site d'Ugine) a montré des exemples liés au forgeage des alliages de titane et à l'optimisation des gammes pour obtenir des structures d'alliages monophasés destinés aux parties chaudes des moteurs dans l'aéronautique et d'alliages biphasés destinés aux pièces de structures à hautes caractéristiques mécaniques. L'obtention de telles structures est réalisée par un processus complexe incluant un premier forgeage sous le transus  $\beta$  pour briser la macrostructure issue de la solidification du lingot, puis un second forgeage au dessus du transus, pour homogénéiser le grain  $\beta$ , suivi par un refroidissement rapide et un forgeage ultérieur adapté au type d'alliage : déformation au dessus ou au dessous du transus pour obtenir, soit une structure équiaxe pour privilégier la tenue à la fatigue, soit une structure aciculaire pour privilégier la ténacité.

La quatrième conférence applicative, présentée par Alexis GAILLAC, de la société AREVA Cezus (site d'Ugine), a montré des exemples liés au forgeage des alliages de zirconium (gainage des combustibles nucléaires), qui constitue la première étape de mise en forme de ces matériaux et qui conditionne le bon déroulement des opérations ultérieures. Les simulations numériques et les modèles analytiques ont permis d'améliorer les conditions de dégrossissage au niveau de la température et des conditions de déformations sur étampes pour éviter des hétérogénéités de structures sur les demi produits obtenus par forgeage. Ces méthodes ont également permis d'éliminer les retassures, problème important pour des produits obtenus par fusion à l'arc comme le zirconium.

**2 – Seconde partie :** Il s'agit dans cette partie de l'apport des techniques de simulation numérique au contrôle des paramètres process et à l'aide à la conception des gammes de forgeage. Cette partie a regroupé deux conférences relatives aux sujets précités.

La première conférence, présentée par Zakaria ALLAM de l'ENSAM de Metz, a montré l'intérêt de l'aide à la décision, en amont du processus de forgeage, pour déterminer les paramètres clés du processus à contrôler en fonction des moyens de production et de la morphologie de la pièce. Il a été décrit également un deuxième système, en aval du processus de forgeage, qui permet de déterminer et de modifier les lois en reliant les variables produit/gamme aux paramètres du process. Cette méthodologie, appliquée dans le domaine de la forge sur une pièce type où le contrôle du process est très difficile à mettre en place au vu de la quantité des paramètres entrant en jeu lors de la fabrication, a par exemple mis en évidence l'importance du paramètre température, et à un degré moindre, du lubrifiant.

La deuxième conférence, présentée par Lionel FOURMENT du CEMEF (Sophia Antipolis) a montré l'intérêt des méthodes numériques d'optimisation d'aide à la conception des gammes de forgeage. Il s'agit de formuler ce modèle de conception avec les contraintes à respecter, les paramètres du process et les objectifs à atteindre. Les principaux algorithmes d'optimisation sont les algorithmes de gradient (prise en compte des incertitudes du gradient) et les algorithmes génétiques à base de modèles d'approximation élaborés à partir d'un plan d'expérience pour résoudre les problèmes les plus complexes et suggérer plusieurs familles de solutions. Des exemples de conception de gammes complexes de forgeage spécifiques notamment à l'industrie aéronautique et aux alliages de titane, ont été donnés.

**3- Troisième partie :** Cette partie a été relative à l'évolution des outils de forgeage et à l'utilisation de la forge comme moyen d'assistance au laminage et à la métallurgie des poudres. Cette dernière partie de la journée a regroupé trois conférences.

La première conférence, présentée par Frédéric PERDRISSET, d'AREVA Creusot Forge, a été relative à un investissement nécessité par l'accélération du marché de la forge libre dans la dernière décennie. Cet investissement (presse de 9000 Tonnes et manipulateur de 200 Tonnes) permet de proposer des gammes de fabrication optimisées par rapport aux productions actuelles. Il est possible en particulier de forger des lingots d'une bonne répartition de taille (15 à 60 Tonnes) avec une réduction du nombre de chaudes, une bonne maîtrise de la taille de grains dans le cas des aciers inoxydables et une forte diminution de la perte au feu. Il est possible également de réaliser des pièces complexes avec fond et couvercle, et une extension

vers la mise en œuvre de nouveaux alliages : aciers duplex, alliages base nickel, aciers pour moules. Cet investissement, qui vient de démarrer, remplace un équipement qui remontait à 1954 et constitue un outil décisif par sa contribution à la modernisation de la profession.

La deuxième conférence, présentée par Jonathan DAIRON d'Industeel (CRMC, Le Creusot), a montré la mise en œuvre de tôles épaisses et de viroles à partir de lingots de 8 à 130 Tonnes avec des épaisseurs pouvant atteindre 1,3 m. Dans ce cas, le forgeage est une opération préliminaire qui permet des déformations plus homogènes et une fermeture des porosités pour des taux de réduction compris entre 0,6 et 0,8. Grâce aux outils de simulation numérique, les gammes de fabrication peuvent être optimisées depuis le lingot de départ jusqu'au traitement thermique : optimisation de la forme des lingotières, réduction de la taille du lingot et de la ségrégation, approche couplée métallurgie mécanique avec comme conséquence une bonne homogénéité des caractéristiques mécaniques dans le sens de l'épaisseur. Des exemples ont été donnés sur des produits épais destinés à l'industrie : plaques tubulaires pour appareils à pression et tôles épaisses destinées à la fabrication de pièces fortement sollicitées.

La troisième conférence, présentée par Gérard RAISSON, de la Direction Technique d'Aubert et Duval à Clermont Ferrand, a montré l'apport du forgeage à la mise en œuvre de pièces de grandes dimensions par métallurgie des poudres. Le forgeage de demi-produits obtenus par métallurgie des poudres est relativement aisé avec un comportement superplastique pour des alliages base nickel à des températures comprises entre 1120 et 1050°C. L'isotropie des caractéristiques est conservée par le forgeage de tels produits et l'intérêt de cette technique est l'obtention de produits dont les dimensions sont hors de portée de la compaction isostatique à chaud, avec une meilleure possibilité de contrôle des défauts de petite taille, liés notamment aux précipitations d'oxydes aux limites des grains de poudres initiaux.

En conclusion, l'intérêt industriel de cette journée a été suscité notamment par les aciers austénitiques fortement alliés et les superalliages, pour lesquels on ne peut pas corriger les imperfections microstructurales dues à la forge par le biais des traitements thermiques. Les laboratoires ont répondu par des recherches parfois assez fondamentales, mais le colloque témoigne que certaines aujourd'hui ont trouvé leur application industrielle.