

Les alliages à mémoire de forme : des matériaux aux propriétés mécaniques singulières

K. Chastaing¹, A. Denquin¹, D. Caillard², P. Ochin³, P. Vermaut⁴, R. Portier⁴

¹ ONERA (DMMP) 29, avenue de la division Leclerc F-92322 Châtillon cedex

² CEMES (groupe MC2) 29, rue Jeanne Marvig, BP 94347 F-31055 Toulouse Cedex 4

³ ICMPE-UMR CNRS 7182, 15 rue G. Urbain, 94400 Vitry, France

⁴ Groupe de Métallurgie Structurale UMR-CNRS 7045 - ENSCP 11, rue P. et M. Curie F-75231 Paris

Les alliages à mémoire (AMF) possèdent des propriétés fonctionnelles remarquables, la superélasticité, la mémoire de forme simple ou double et les propriétés d'amortissement. Ceci présente un très grand intérêt pour de nombreuses applications médicales et industrielles.

Ainsi, ils peuvent exercer un travail lors du changement de forme induit par une variation de température. Ceci permet de les utiliser comme éléments d'activateur. Dans les systèmes habituels, un dispositif de mesure de température est associé à l'alimentation d'un moteur. Quand la température de consigne est atteinte, le moteur est alimenté électriquement et il peut réaliser l'action souhaitée. Ici, lorsque la température est atteinte, l'élément en AMF change de forme et effectue l'action en développant une force suffisante. Le dispositif est simplifié, beaucoup plus léger, moins encombrant et sans risque d'étincelle.

Ces propriétés remarquables sont contrôlées par une transformation structurale displacive réversible du premier ordre, une transformation martensitique à caractère thermoélastique entre l'austénite (phase haute température) et la martensite (phase basse température). Le caractère displacif est dominé par le cisaillement du réseau de l'austénite et il en résulte que la transformation est contrôlée par l'énergie de déformation. Ainsi, pour une composition chimique de l'alliage, les caractéristiques de cette transformation dépendent dramatiquement de la microstructure donc par conséquent, des conditions d'élaboration et de toute l'histoire thermomécanique du matériau.

Nous allons passer en revue quelques exemples classés selon trois catégories d'alliages dont les températures de transformation se situent dans des gammes différentes, ce qui leur ouvre des champs d'applications différents. Nous insisterons sur la corrélation entre la microstructure induite par les étapes de l'histoire thermomécanique et les caractéristiques de la transformation et les propriétés fonctionnelles de l'alliage.

- Les alliages basses températures (inférieures à 80 °C)

De nombreuses applications de ces alliages existent en particulier dans les domaines médicaux et dentaire. Les alliages TiNi et TiNiCo sont représentatifs de cette catégorie. Nous examinerons le cas des transformations martensitiques multiples, se produisant en plusieurs étapes dans le cas d'un spécimen déformé puis recuit (influence des parois de dislocations) et dans celui d'un spécimen élaboré par « melt spinning » (influence de précipités cohérents).

- Les alliages moyennes températures (de 100 à 200 °C)

Les alliages avec de hautes températures de transformation ont un très vaste champ d'applications potentielles (industrie automobile, électrotechnique) cependant, un manque de ductilité rend leur mise en forme délicate, voire impossible. Nous avons, de ce fait, exploré des techniques d'élaboration basées sur la solidification rapide afin d'obtenir l'alliage sous une forme utilisable directement : la technique de « twin roll casting » pour la production de tôles et la méthode « In rotating Water Melt spinning » pour la production de fil. Les alliages étudiés sont Ni-Ti-Hf et les bases Cu-Al-Ni. D'une part, nous décrirons le mode de déformation à l'état martensitique du Ni-Ti-Hf, différent de celui de Ni-Ti et les capacités d'éducation de cet alliage. D'autre part, nous commenterons le comportement mécanique des tôles et des fils d'alliages base Cu-Al-Ni, bruts d'élaboration mais qui présentent les propriétés superélastiques.

Enfin, une autre voie d'élaboration de ces alliages peu ductiles sera décrite. Il s'agit de la formation de verres métalliques d'alliages multiélémentaires base Ni-Ti, afin de profiter des propriétés superplastiques dans le domaine du liquide surfondu pour réaliser la mise en forme et la cristallisation afin de retrouver la transformation martensitique.

- Les alliages hautes températures (supérieures à 500 °C)

Ce domaine de hautes températures intéresse l'industrie aéronautique. Un certain nombre d'alliages répondent aux critères souhaités mais ils doivent être caractérisés des points de vue structurale et microstructurale et pour leur comportement mécanique. Cette investigation a porté sur le système Ru-Nb avec quatre alliages Ru₅₀.

$x\text{Nb}_{50+x}$ ($x = 0, 2, 4, 5$). Selon la composition, ces alliages présentent une ou deux transformations de phase : à partir de la phase cubique β stable à haute température se forme la phase d'équilibre β' tétragonale (entre 890 et 490 °C) puis la phase d'équilibre β'' monoclinique (entre 750 300 °C).

L'utilisation d'un porte-objet chauffant au MET a permis, par l'observation in situ de la transformation $\beta \rightarrow \beta'$ dans l'alliage tétragonal $\text{Ru}_{45}\text{Nb}_{55}$, de confirmer le caractère displacif de la transformation (chaque variant présente un maillage interne fin de type (011) compound qui réalise la déformation à réseau invariant de la transformation). Pour la transformation $\beta' \rightarrow \beta''$ ($\text{Ru}_{50}\text{Nb}_{50}$), l'observation in situ montre un maillage fin ainsi que la formation de domaines ordonnés.

Du point de vue du comportement mécanique, l'effet mémoire simple associé à la transformation $\beta \rightarrow \beta'$ a conduit à une déformation récupérable de l'ordre de 2.2% ($\text{Ru}_{50}\text{Nb}_{50}$) et de 1.4% pour $\text{Ru}_{45}\text{Nb}_{55}$. Pour la transformation $\beta'' \rightarrow \beta'$ ($\text{Ru}_{50}\text{Nb}_{50}$), le recouvrement de forme est seulement de l'ordre de 0.4%. L'observation in situ avec un porte échantillon de traction montre, en phase β' , un réarrangement de la martensite et, en phase β'' , un réarrangement modéré des parois de macles héritées de la transformation $\beta \rightarrow \beta'$.