

Mécanismes de déformation et de rupture de nouveaux alliages de titane transformables par déformation : une approche multi-échelle

Chloé VARENNE^{a,b}, Frédéric PRIMA^b, Jacques BESSON^a, Cédrik BROZEK^b, Julie BOURGON^c, Anne-Françoise GOURGUES-LORENZON^a

a. MINES ParisTech, PSL Research University, Centre des Matériaux, UMR CNRS 7633, BP 87, 91003 EVRY cedex ; e-mail : prenom.nom@mines-paristech.fr

b. Chimie ParisTech, PSL Research University, Institut de Recherche de Chimie Paris, Equipe de Métallurgie Structurale, UMR CNRS 8247, 11 rue Curie, 75005 PARIS ; e-mail : prenom.nom@chimieparistech.psl.eu

c. UPE Université Paris Est, ICMPE (UMR 7182) CNRS-UPEC, 94320 THIAIS ; e-mail : bourgon@icmpe.cnrs.fr

Résumé

La réalisation d'essais mécaniques statiques et dynamiques et leur comparaison sur un alliage de titane transformables par effet TWIP (**T**Wining **I**nduced **P**lasticity) couplées à des analyses microstructurales à l'échelle macroscopique, microscopique mais aussi nanométrique ont permis de mettre en évidence les différents mécanismes de déformation activés suivant la sollicitation appliquée et de les relier aux mécanismes de rupture de l'alliage afin de dégager quelques pistes de compréhension quant à l'importante résistance à l'endommagement de cette famille d'alliages de titane.

Mots clés : Alliages de titane, écrouissage, maclage mécanique, rupture ductile.

1. Introduction

Les alliages de titane β conventionnels présentent une ductilité (environ 15 %) et un écrouissage (environ 80 MPa) limitants pour certaines applications de structure. De récents progrès sur les aciers, impliquant la plasticité induite par maclage (TWIP) ont permis une amélioration des propriétés par effet dit « Hall-Petch dynamique » (affinement progressif de la microstructure). Une transposition aux alliages de titane a conduit au développement d'alliages transformables par déformation, aux propriétés (ductilité, capacité d'écrouissage) nettement améliorées par rapport aux alliages de titane conventionnels [1]. Une approche semi-empirique a été développée pour la conception de ces nouveaux alliages, mettant en relation chimie des alliages et mécanismes de déformation. Elle a été mise en application sur des alliages binaires, ternaires et quaternaires [2].

Les questions posées par le comportement de ces alliages prometteurs sont encore nombreuses. Ainsi, nous nous attachons ici à comprendre, à différentes échelles, les mécanismes de déformation et de rupture que présentent ces alliages face à des sollicitations variées. On cherche en particulier à évaluer le rôle du maclage mécanique sur la résistance à l'endommagement afin d'établir un critère de conception d'alliages TWIP plus robuste, pour une résistance à l'endommagement optimale.

2. Essais mécaniques et analyses microstructurales

2.1 Essais mécaniques

La résistance à la rupture ductile a été explorée dans un domaine de sollicitation plus large que celui actuellement connu pour ces alliages. En se concentrant sur l'alliage Ti-8,5Cr-1,5Sn (% mass.) à température ambiante, présentant l'effet TWIP, le lien entre évolution microstructurale lors de la déformation et mécanisme de rupture est approfondi par la réalisation de divers essais mécaniques (Fig. 1) : traction sur éprouvettes lisses ou entaillées, résilience Charpy et éprouvettes de ténacité permettant de faire varier, outre la direction de prélèvement :

- Le taux de triaxialité des contraintes, moteur de la croissance des cavités en rupture ductile,
- Le paramètre de Lode (éprouvettes entaillées planes ou axisymétriques) qui influence la tendance à localiser la déformation,
- La vitesse de sollicitation (compétition entre maillage et glissement des dislocations).

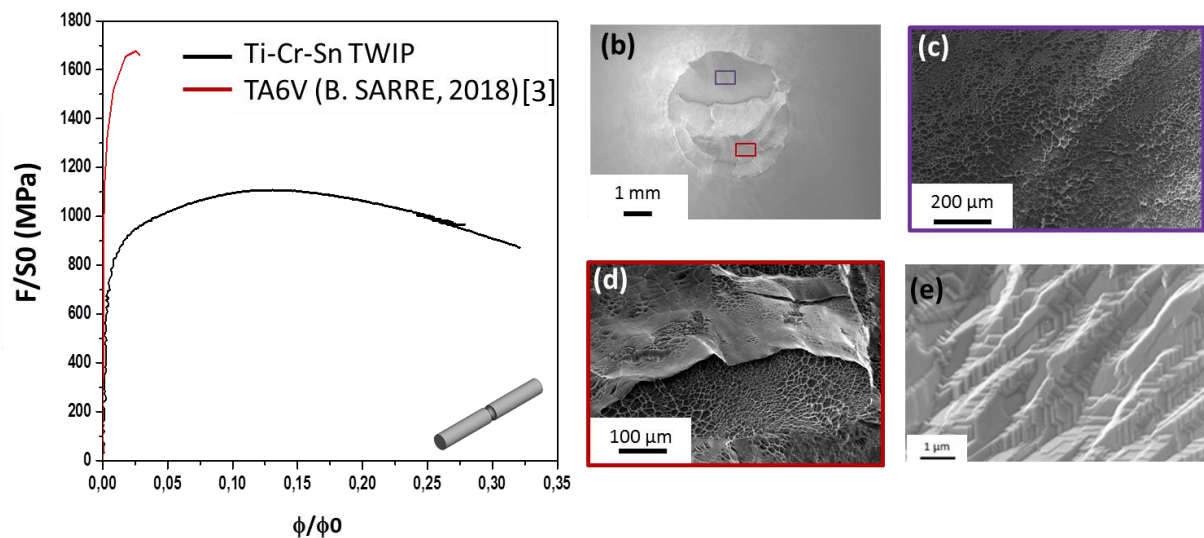


Figure 1. (a) Comparaison de l'évolution de la réduction de diamètre en fonction de la contrainte appliquée lors d'un essai de traction sur éprouvette entaillée NT4 (représentation 3D en insert) ; (b) Fractographie à faible grossissement au MEB d'une éprouvette entaillée NT4 et mise en évidence des caractéristiques du faciès : (c) cupules classiques ; (d) « terrasses » et (e) zones facettées sur les parois de cupules

Ces essais ont permis de mettre en évidence de meilleures propriétés mécaniques, notamment d'excellentes valeurs de ténacité et de résilience (respectivement $165 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$ et $193 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$), pour ces alliages TWIP par rapport aux alliages de titane conventionnels (ex : TA6V). On peut également attester de l'importante résistance à la localisation de la déformation de cette famille d'alliages lors des essais de traction uniaxiale sur éprouvettes entaillées.

On s'intéresse alors à la réduction de diamètre de l'entaille, suivie in situ lors de l'essai, menant à une déformation radiale à rupture de 30 % pour le Ti-8,5Cr-1,5Sn TWIP contre 5 % pour le TA6V (Fig. 1a). Ce résultat nouveau montre un comportement rigoureusement différent des alliages transformables par déformation, comparés aux alliages de titane conventionnels.

2.2 Analyses microstructurales à différentes échelles

Quel que soit l'essai mécanique réalisé, y compris pour les sollicitations rapides en résilience Charpy, des fractographies détaillées ont révélé un paysage varié de rupture : de larges régions planes composées de cupules classiques, parfois organisées en « terrasses » reliées par des « contremarches » très lisses (Fig. 1. c et d). Certaines parois de cupules sont également composées de zones facettées (Fig. 1. e), signes d'une plasticité très localisée y compris à ce stade ultime de la

déformation. Ces caractéristiques de la rupture ont été corrélées avec la microstructure sous-jacente, par analyses de coupes polies près de la surface de rupture. Aucun endommagement (porosité, fissure) n'a été observée sous la surface de rupture, attestant d'une grande résistance à la germination de cavités. L'importante taille de grain initiale (environ 500 μm) reste visible sur la surface de rupture et semble être corrélée à la taille des larges zones planes (Fig. 1.c.).

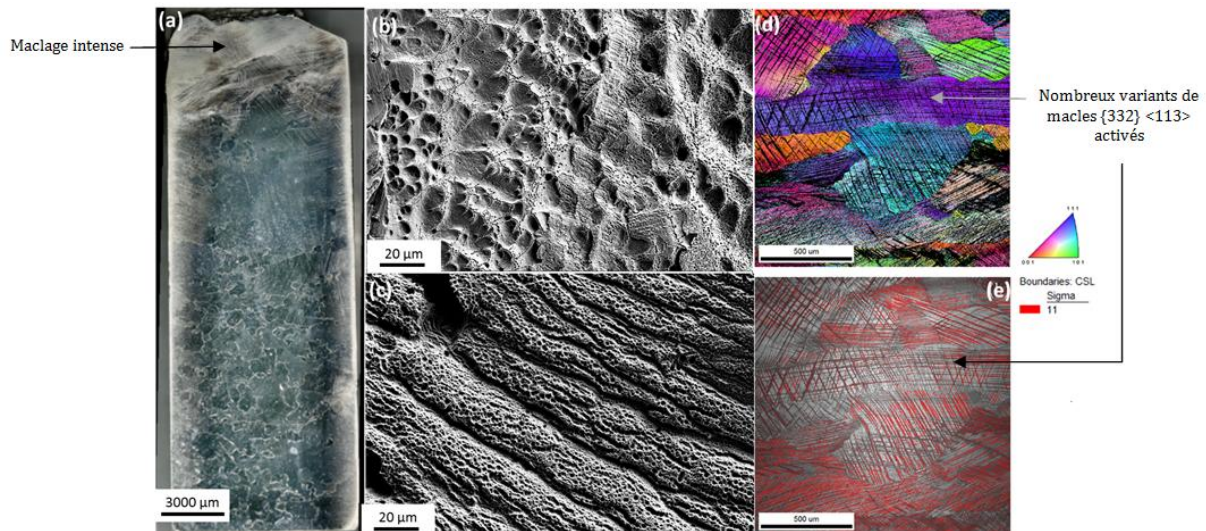


Figure 2. (a) Coupe polie attaquée d'une demi-éprouvette entaillée Charpy (zone claire : maillage intense); (b) (c) Fractographies révélant différents types de faciès ductiles caractéristiques; (d) Cartographie EBSD en figure de pôle inversée d'une zone proche du faciès de rupture; (e) Carte en qualité de cliché (IQ) associée et joints $\Sigma 11$ (en rouge) caractéristiques des macles $\{332\} \langle 113 \rangle$

Le maillage mécanique (effet TWIP) a également été mis en évidence, notamment l'importante densité de macles créées lors de la déformation. Près de la surface de rupture, où a été faite l'analyse EBSD (Fig 2. d et e), on observe une surface maillée à environ 50 % en moyenne, avec une densité locale de macles qui semble dépendre de l'orientation des grains par rapport à la sollicitation. La largeur de ces macles (5-15 μm) et des espaces inter-macles (20-80 μm) est similaire à celles des plus grandes facettes sur les parois des cupules. Il semblerait par ailleurs que l'alliage se déforme par multiplication de macles (plutôt que par grossissement de celles-ci comme observé sur l'alliage Ti-12Mo [4]).

Enfin, l'importante densité de macles près du faciès de rupture des éprouvettes testées a conduit à mener une étude à l'échelle plus fine au MET sur des éprouvettes Charpy rompues, de nouveau au plus près du faciès de rupture (Fig. 3).

Cette deuxième série d'analyses a mis en évidence des systèmes de maillage plus fins que ceux identifiés précédemment (100-400 nm de largeur pour les deux systèmes de maillage). Cette taille est similaire à celle des plus petites marques de plasticité sur les cupules (Fig. 1e). L'analyse approfondie des macles a montré que les deux systèmes de macles ($\{332\} \langle 113 \rangle$ et $\{112\} \langle 111 \rangle$) étaient le siège d'une déformation localisée importante, au vu de la forte désorientation au sein des macles mise en évidence par analyse PACOM (Fig. 3.c). L'organisation hiérarchique des macles (macles secondaires dans les macles primaires) a également été mise en évidence. Ce phénomène d'écrouissage de macles pourtant très fines pourrait participer à l'importante capacité d'écrouissage de ces alliages : dans ces matériaux, les macles sont elles-mêmes capables de se déformer de manière importante.

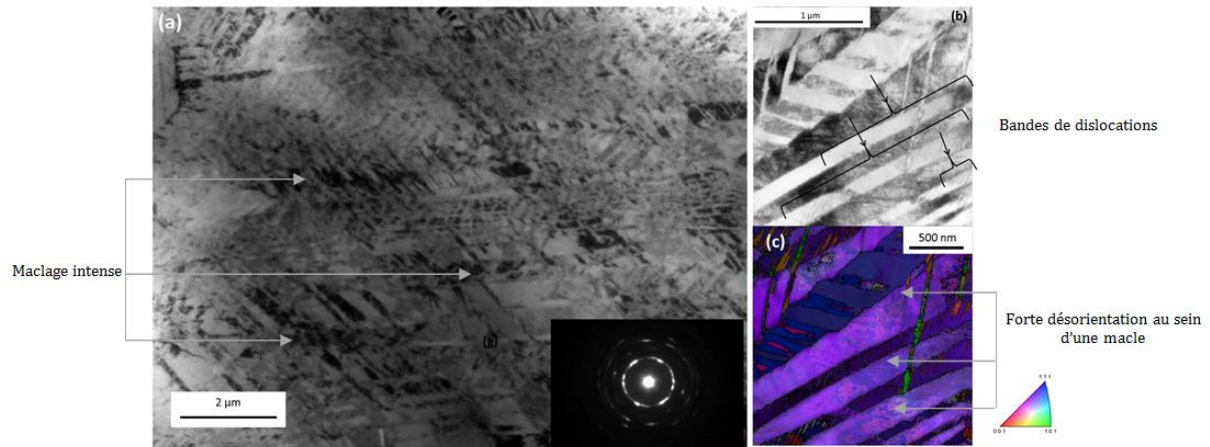


Figure 3. a) Image en champ clair d'une zone proche du faciès de rupture d'une éprouvette entaillée Charpy et cliché de diffraction associé ;
 b) Image en champ clair virtuel (Virtual Bright Field) obtenu lors d'une analyse PACOM (Precession-Assisted Crystal Orientation Mapping) au MET (les accolades et flèches noires marquent les bandes de dislocations) ;
 c) Cartographie en figure de pôle inversée associée attestant de la forte désorientation au sein des macles

3. Conclusion

Les travaux de thèse ont permis jusqu'ici de mettre en évidence l'amélioration des propriétés mécaniques apportées par l'effet TWIP dans les alliages de titane transformables par déformation. La rupture, ductile, semble fortement liée à l'évolution microstructurale pendant la déformation. De plus, la présence d'un maillage à plusieurs échelles, sous différents types de sollicitation (statique et rapide, traction ou flexion) a été démontrée et semble être responsable du fort écrouissage et de l'importante ductilité de ces alliages quel que soit le mode de sollicitation dans la gamme explorée.

Les travaux actuels comprennent une étude en température afin de faire varier l'énergie de défaut d'empilement et la compétition entre maillage et multiplication des dislocations. On s'attache à caractériser les mécanismes de déformation et de rupture activés afin d'approfondir la compréhension de la résistance à l'endommagement de ces alliages de titanes transformables par déformation.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Yvon MILLET de TIMET Savoie pour avoir fourni le matériau nécessaire à cette étude.

Références

- [1] C. Brozek et al. (2016). *Scr. Mater.*, 114, p. 60-64.
- [2] H. Adachi et al. (1978). *J. Phys. Soc. Japan* 45, p. 875.
- [3] B. Sarre (2018). *Influence du soudage laser Nd:YAG sur les propriétés métallurgiques et mécaniques de l'alliage de titane TA6V*. Thèse de l'Université de Technologie de Troyes.
- [4] F. Sun et al. (2010). *Mater Sci Eng A.*, 527:4262