

Les métaux amorphes et à haute entropie

21 avril 2017, 02:00

Thomas Kairet

Les alliages métalliques amorphes et à haute entropie, encore peu connus, ont des propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion très intéressantes. Le point sur leurs caractéristiques, avec un exemple d'application (un engrenage à onde de déformation).

Les métaux à haute entropie font partie des matériaux aux propriétés très prometteuses. Récemment, plusieurs articles scientifiques ont passé en revue les concepts et propriétés associés à ces alliages. Elles montrent qu'ils ont une série d'applications prometteuses au niveau structural, des caractéristiques magnétiques intéressantes et une résistance à la corrosion supérieure à celle des alliages classiques.

Ces alliages sont obtenus par:

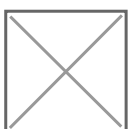
- Un effet « cocktail »: de nombreux éléments chimiques sont présents.
- Un refroidissement rapide.
- Une distorsion importante du réseau cristallin grâce aux éléments d'alliage avec un rayon atomique fort différent

Il en résulte une microstructure désordonnée (dès lors à haute entropie). Des compositions différentes aboutissent à des propriétés mécaniques différentes.

Les alliages à haute entropie peuvent avoir une organisation à longue distance et les éléments qui les composent sont présents dans des proportions semblables. Il n'est pas possible de les classer sur base d'un élément principal. Les alliages appelés verres métalliques sont eux complètement amorphes; ils constituent un sous-ensemble des métaux à haute entropie [1]. Ils se caractérisent par un élément principal : Base Fe, Base Cu, Base Ti, Base Cu, Base Mg,...

Les alliages à base Titane

Tableau 1 : Compilation de propriétés mécaniques de verres métalliques base Ti. σ_y : limite élastique en tension, σ_{max} : limite ultime, $\sigma_c = \sigma_y$ [2], ϵ_f : déformation plastique



(Cliquez pour agrandir)

Le Tableau 1 et le tableau 2 reprennent les propriétés de nombreux verres métalliques à base Ti. Leurs caractéristiques sont au moins 100% supérieures à celles de l'alliage aéronautique Ti-6Al-4V

recuit.

On observe une variabilité importante de la déformabilité plastique : suivant la composition, elle varie de 0 à 11%. A titre de comparaison, la déformabilité minimum garantie du Ti-6Al-4V est de 10%.

La densité des verres métalliques listés dans les tableaux est 0 à 63% plus élevée que celle de l'alliage Ti-6Al-4V dont la densité est de 4.4.

Tableau 2 : Compilation de propriétés mécaniques de verres métalliques base Ti. σ_y : limite élastique en tension, σ_{max} : limite ultime, $\sigma_c = \sigma_y$. [2], ϵ_f : déformation plastique



(Cliquez pour agrandir)

Les alliages légers : Base Mg

Le magnésium est un élément très abondant. Il reste néanmoins sous-utilisé dans de nombreux secteurs. Les propriétés mécaniques des alliages Mg classiques sont cependant inférieures à celles des aluminiums (série 7000 ou série 2000) et, de plus, les alliages de magnésium sont inflammables.

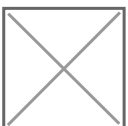
Tableau 3 : Compilation de propriétés mécaniques de verres métalliques base Mg et autres alliages haute entropie [3]



(Cliquez pour agrandir)

Les propriétés mécaniques de ces alliages Mg haute entropie sont comparables à celles des alliages d'aluminium aéronautique (tableau 4) pour une densité 10 à 20% inférieure.

Tableau 4 : Minimum design allowable extracted from MIL-HDBK-5J



(Cliquez pour agrandir)

Les alliages à base de Zr

Les verres métalliques de Zr ont des propriétés mécaniques comparables à celles des verres métalliques base Ti. Leur module de Young est plus faible que les autres alliages (base Ti, base Fe,...). Ils sont plus adaptés aux applications biomédicales car ils ont une meilleure biocompatibilité [8].

Tableau 5 : Compilation de propriétés mécaniques de verres métalliques base Zr. σ_y : limite élastique en compression, σ_f : limite à rupture, ϵ_f : déformation plastique [4]



(Cliquez pour agrandir)

Résistance à la corrosion

La résistance des alliages à haute entropie a été testée dans différents environnements et il en ressort que leur capacité à se passiver dépend des éléments d'alliages dans la composition. La présence d'élément comme Cr ou Al non ségrégué par un autre élément favorise la résistance à la corrosion.



Figure 1 : Comparaison entre la densité de courant de corrosion et le potentiel de pitting entre les alliages à haute entropie et les matériaux classiques dans 3.5% de NaCl à température ambiante [5]

La figure 1 montre la densité de courant de corrosion en fonction du potentiel de pitting dans un environnement à 3.5 % de NaCl et la figure 2 indique l'évolution de la densité de courant dans un environnement à 0.5 M de H_2SO_4 .



Figure 2 : Comparaison entre la densité de courant de corrosion et le potentiel de corrosion entre les alliages à haute entropie et les matériaux classiques dans 0.5 M de H_2SO_4 à température ambiante [5]

Exemple d'application : Engrenage à onde de déformation

La NASA a déposé un brevet [6] pour un engrenage à onde de déformation (strain wave gear) dont un des éléments est à base de verre métallique. L'engrenage est composé de 3 grandes parties :

- L'enveloppe externe
- L'enveloppe interne flexible (flexspline)
- L'axe central

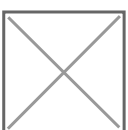


Figure 3 : Schéma de l'engrenage à onde de déformation [7]

Les principaux intérêts de cet engrenage à onde de déformation sont :

- Un jeu très réduit entre les éléments
- Un rapport de transmission élevé avec une grande compacité
- Un couple de transmission élevé également

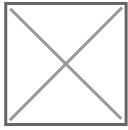


Figure 4 : Exemple d'enveloppe interne flexible à faire en verre métallique [6]

L'enveloppe interne est initialement circulaire; elle est déformée par la forme de l'axe interne. Cette enveloppe flexible doit être fabriquée en un matériau à déformation élastique élevée mais avec une haute dureté pour résister à l'usure au contact entre les dents de l'enveloppe externe et interne. Un verre métallique à faible module (les verres à base de Zr) et à limite élastique élevée (Tableau 5) a les propriétés idéales pour ce type d'application.

Sources

[1] A critical review of high entropy alloys and related concepts, Acta Materialia 122 (2017) 448-511

[2] Review on the Research and Development of Ti-Based Bulk Metallic Glasses, Metals 2016, 6, 264 (<http://www.mdpi.com/2075-4701/6/11/264>)

[3] An Insight into Evolution of Light Weight High Entropy Alloys: A Review, Metals 2016, 6, 199 (<http://www.mdpi.com/2075-4701/6/9/199>)

[4] A Series of Zr-Based Bulk Metallic Glasses with Room Temperature Plasticity, Materials 2016, 9, 408 (<http://www.mdpi.com/1996-1944/9/6/408>)

[5] Corrosion-Resistant High-Entropy Alloys: A Review, Metals 2017, 7(2), 43 (<http://www.mdpi.com/2075-4701/7/2/43>)

[6] Patent: US 9,328,813 B2 Systems and methods for implementing bulk metallic glass-based strain wave gears and strain wave gear components

[7]https://fr.wikipedia.org/wiki/Engrenage_à_onde_de_déformation

[8] Recent advances in bulk metallic glasses for biomedical applications, Acta Biomaterialia 36 (2016) 1–20

Auteurs



Thomas Kairet