JANVIER 2020

LE GOLF ET LA METALLURGIE
Comment un choix matériau a obligé la fédération à revoir la norme liée aux drivers ?

3ème partie : Approche métallurgique des alliages de titane destinés au driver.

Après avoir analysé l'approche balistique et mécanique des alliages de titane utilisé comme driver afin de décrire l'effet trampoline qui à forcer les fédérations internationales de golf à revoir le design d'un driver, il nous parait nécessaire d'aborder dans cette 3ème partie la métallurgie des alliages de titane utilisés dans le golf.

I.1. Elaboration et limite économique des alliages de titane.

Les minerais de titane sont relativement abondants dans l'écorce, on les trouve sous la forme d'oxydes très stables tels que l'ilménite (FeTiO3) et le rutile (forme naturelle du dioxyde de titane 97 à 98.5% TiO_2). Avant 1940, il n'était pas possible de produire, à des coûts raisonnables des alliages de titane ; il a fallu attendre l'arrivée du procédé Kroll pour produire du titane grâce à une carbo-chloruration à 800°C (réaction 1), une réduction au magnésium ou au sodium vers 900°C (réaction 2) puis une purification sous vide à 800°C.

Réaction 1 (carbo-chloration) : $TiO_2 + 2Cl_2 + 2C \Rightarrow TiCl_4 + 2CO$

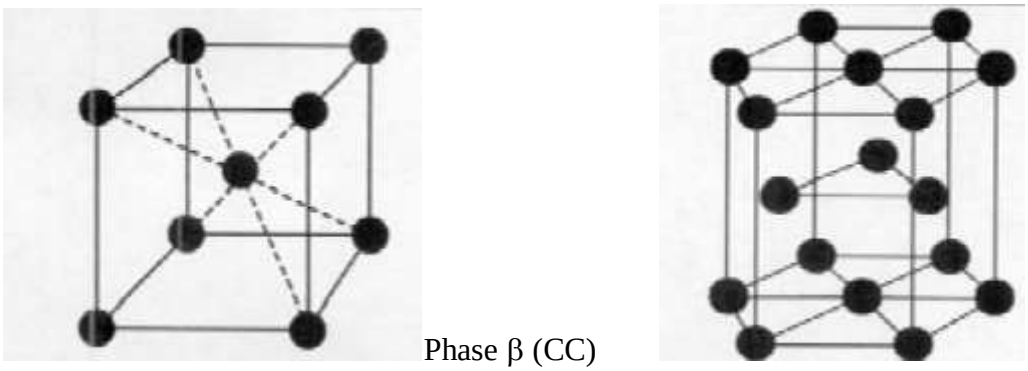
Réaction 2 (Procédé Kroll) : $TiCl_4 + 2Mg \Rightarrow Ti + 2\ MgCl_2$

Avant purification, le semi-produit est une éponge de titane impure qui sera utilisable après avoir éliminé le magnésium et son dérivé chloré ($MgCl_2$). A ce stade, il est possible d'élaborer des lingots de titane (et/ou d'alliages de titane) au four électrique à arc à électrode consommable ou pas.

La production d'éponge en 2012 était de 260 000 tonnes et les principaux producteurs sont la Chine, le Japon, la Russie et le Kazakhstan. A titre de comparaison, on a produit à la même époque plusieurs centaines de million de tonnes d'acier.

On ajoute des éléments d'alliages principalement pour augmenter les propriétés mécaniques (de 1 à 20% suivant l'alliage). Ils ont un effet dit alphagène (Al, N, C, O, …), neutre (Zr, Sn, …) ou bétagène (V, Mo, Nb, …), en sachant que les phases α et β correspondent aux 2 réseaux d'empilement d'atomes du titane (Cf. figure 1) et que le réseau β se transforme au refroidissement en un empilement de type α à 882°C.

JANVIER 2020



Phase β (CC) Phase α (HC)

Figure 1 : Structures cristallographiques du titane.

Chaque cristal, qu'il soit cubique, centré (CC) ou hexagonal compact (HC), a des prédispositions particulières : le réseau cristallin α favorisera par exemple la soudabilité et l'aptitude au fluage de l'alliage alors que la phase β facilitera la mise en forme à froid (également à chaud) et la forgeabilité. Certains de ces points sont importants à prendre en compte au niveau de la fabrication des clubs de golf.

D'un point de vue économique et de façon très approximative, le minerai composé d'oxyde de titane avoisine les 1€/kg, le coût matière est multiplié environ par 10 pour obtenir l'éponge, puis par 2,5 pour aboutir à un lingot. Mais vu que les matières premières sont devenus un outil de spéculation, il est possible, en fonction de l'actualité géopolitique, d'acquérir de l'éponge à 30€/kg (en 2005, source les échos). Par conséquent, l'essor du titane est encore freiné par son coût d'élaboration.

I.2. La mise en œuvre du titane et de ces alliages

Alors que l'émergence de l'élaboration industrielle du titane apparait au tout début des années 50, les premiers drivers en titane sont apparus uniquement au début des années 90. Ils se sont imposés pour les raisons que nous avons expliquées dans le précédent chapitre (effet trampoline, sweetspot élargi), il existe différentes configurations de conception : la face de frappe est forgée, puis soudé au corps et le corps peut être moulé monobloc (ex : Ti-6Al-4V) ou composé d'un assemblage soudé associant la couronne et la semelle, éléments mis en forme à froid à partir de tôle en titane pur (type T40 grade 2) ou en alliage β (ex : Ti-15V-3Cr-3Sn-Al) (Cf. figure 2).

JANVIER 2020

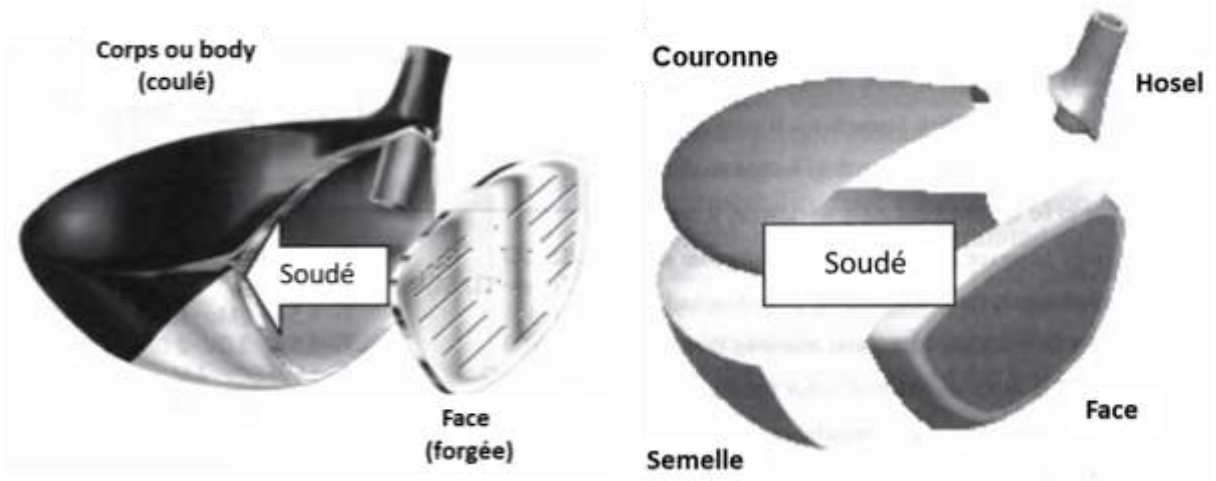


Figure 2 : Drivers à corps moulé ou formé à froid puis soudé. [2]

- La méthode de moulage utilisée pour les fabriquants de driver correspond à de la cire perdue à grappe. Pour information, il existe une autre méthode pour les pièces massives à faible précision dimensionnelle : le moulage en graphite à modèle permanent, qui s'apparente à du moulage sable traditionnel.
  L'opération de moulage du titane est une opération délicate puisque les compositions chimiques des bases titane ont généralement une température de fusion élevée et ont été globalement mises au point pour des pièces laminées, forgées, matricées, … Nombreux alliages industriels peuvent être caractérisés par leur faible coulabilité, une conductivité thermique peu élevée, une tendance à la fissuration lors du refroidissement et une forte sensibilité aux micro-retassures nécessitant un masselottage important.

  A l'ensemble de ces points, on peut ajouter une très forte réactivité chimique qui nécessite de réaliser le moulage sous vide ou sous gaz neutre (argon), si l'on souhaite limiter la contamination de la surface par formation « alpha-case ». Un usinage chimique fluonitrique peut être nécessaire si la pièce réalisée est sollicitée en fatigue. D'un point de vue métallurgique, l'état microstructural de la pièce moulée est très difficile à modifier par des traitements thermiques. Les conditions de solidification auront donc une influence directe sur les propriétés de la pièce en service.

- La principale technique d'assemblage des éléments constitutifs d'un driver reste le soudage (laser, TIG, …) mais on peut également trouver des éléments collés. Tout comme en fonderie, le soudage du titane est forte influencé par sa forte réactivité chimique (O, N, H et C). L'oxydation des zones soudées entraîne une fragilisation locale excessive et des soufflures dans les zones fondues. D'un point de vue ségrégation de phase, sensibilité à la fissuration ou de dégradation de la tenue à la corrosion, les titanes purs « T40 et T60 » sont plus soudables qu'un TA6V. La présence de phase β dans le cordon ou dans la zone affectée thermiquement et sa

transformation éventuelle en phase fragilisant reste le point sensible lorsque l'on aborde le soudage des alliages β et α+β.

I.3. Alliages de titane dans le golf – Structures métallurgiques et traitements thermiques

On retrouve, parmi les alliages sélectionnés par les fabricants de drivers, une large gamme de nuances de titane parmi les alliages α + β ou quasi β qui globalement ont tous une bonne aptitude à la mise en forme grâce à la présence de la phase β (Cf. Tableau 1).

Tableau 1 : Exemples d'alliages de titane utilisés pour la fabrication de face de driver. [3, 4, 5,6]

Dénomination	Phase	%Al	%V	%Mo	%Fe	%Cr	%Zr	%Sn	%Si	%Nb
TA3V	α + β	3	2,5							
TA6V*	α + β	6	4							
TX51AF	α + β	5			1					
Ti 10-2-3	β stable	3	10		2					
Ti-8-8-2-3	quasi β									
SP700	β stable	4,5	3	2	2					
15-3-3-3*	quasi β	3	15			3		3		
15-5-3	quasi β	3		15			5			
DAT 51	quasi β	4	22							
16-4-3-3	quasi β	3	16					4		3
DAT 55G	quasi β	4	15			6				
TVC	quasi β	3	13			11				
SAT2041β	quasi β	4	20					1		

(* On retrouve, entre autre ces nuances pour la réalisation des corps de tête)

Il est important de rappeler que la composition chimique n'est pas le seul paramètre permettant d'obtenir telles ou telles caractéristiques mécaniques et cela est particulièrement vrai pour les alliages de titane. En effet, le choix de la température de mise en forme et les gammes de traitements thermiques va avoir un fort impact sur les différentes structures métallurgiques qu'il sera possible d'obtenir : structure aciculaire, lamellaire, équiaxe, en vannerie, … A chaque structure obtenue correspondra des caractéristiques mécaniques propres. La présence de la phase α au sein de la structure métallurgique permettra d'augmenter les caractéristiques mécaniques (Rp0,2 et Rm) et d'améliorer la soudabilité de l'alliage ; la phase β, quant à elle, permet d'améliorer fortement la ductilité.

II. Conclusion

Utilisé en premier sur les principaux parcours de golf, le driver est le club permettant de franchir la plus grande distance avec sa balle. C'est également l'équipement sportif le plus avancé technologiquement (avec certains putters) tant au niveau des alliages utilisés, comme nous avons pu le constater, qu'au niveau de sa forme.

L'arrivée des drivers en titane dans les années 90 fut une révolution pour le golf, qui a nécessité une évolution des normes au niveau de la valeur maximale du C. O. R. L'avantage du titane est d'avoir une limite d'élasticité assez élevée associée à un module d'Young assez faible par rapport aux aciers pour une densité intermédiaire entre les alliages d'aluminium et celle des alliages fer-carbone. L'ensemble de ces caractéristiques mécaniques permet de fabriquer des drivers avec des surfaces de frappe plus importantes et d'obtenir un fort « effet trampoline » tout en veillant à avoir un coefficient de restitution (C. O. R.) proche des limites autorisées.

Par contre, son faible poids implique souvent de devoir rajouter des masses additionnelles dans la tête pour atteindre un moment d'inertie (MOI) acceptable. Pour cela, il est classique d'observer des inserts en tungstène afin d'augmenter la masse de l'ensemble et de fait augmenter l'énergie cinétique à l'impact : cela permettra de donner plus de vitesse à la balle donc plus de distance à celle-ci.

En ce qui concerne le design d'un driver, il faut savoir que, lors du swing d'un golfeur professionnel, la tête d'un club se déplace à une vitesse moyenne de 120 km/h et est, de fait, soumise à des frottements forts dans l'air. C'est pour cette raison que les fabricants de drivers font appel à des experts en aérodynamisme afin de réduire ces frottements et d'augmenter la vitesse du swing, synonyme d'une plus grande distance parcourue.

Au niveau des perspectives en termes d'innovations techniques, le choix des alliages métalliques sera toujours au cœur des préoccupations des fabricants de driver mais pas uniquement pour l'obtention des caractéristiques mécaniques. En effet, l'émergence de nouvelles technologies de fabrications, autres que le forgeage et les techniques de fonderie à la cire perdue, génère des réflexions au niveau des choix des alliages à utiliser. Ces nouvelles technologies dites « net shape » sont les procédés associés à la fabrication additive (ex : le frittage laser direct de métal (DMLS)) qui permettent d'obtenir des édifices très rigides (en nid d'abeilles) et légères.

A la lecture de cet article, on en arrive à conclure qu'un bon golfeur doit être également un bon mécanicien et un bon métallurgiste s'il souhaite optimiser la distance de frappe et sa sensation au toucher. Mais n'oublions pas que ce n'est pas l'arc qui fait un bon indien ! Il en est de même pour les golfeurs…

Remerciements auprès de Srixon et XXIO pour les illustrations.