



Mai 2016

IMPORTANCE DE LA METALLURGIE DANS LA HAUTE HORLOGERIE

PARTIE 3 : ... la Métallurgie

Bonjour à chacune et chacun d'entre vous,

Pour cette 20^{ème} newsletter, **Métallo Corner** ne perd pas son temps et vous propose de poursuivre son immersion dans **la haute horlogerie**. Les matériaux métalliques jouent un rôle déterminant dans l'innovation puisqu'ils permettent de simplifier les complications d'un mécanisme à condition de choisir les nuances les plus adaptées aux conditions de fonctionnement.

Comme nous l'avons observé dans la Newsletter N°18, les matériaux métalliques doivent systématiquement répondre à plusieurs exigences :

- De mise en œuvre (aptitude à la découpe, aptitude au formage, facilement usinable, aptitude au polissage, ...)
- De fonctionnement d'ordre mécanique (propriétés mécaniques, comportement tribologique, résistance à l'usure abrasive, propriétés ressorts, tenue en fatigue,...)
- D'ordre physico-chimique (amagnétisme, faible coefficient de dilatation thermique, résistance à la relaxation thermique, résistance à la corrosion atmosphérique et en milieu salin, ...)

I. LA METALLURGIE ET L'INNOVATION HORLOGERE

- Les aciers inoxydables (globalement austénitiques)

Avec quelques nuances martensitiques du type 420F (X46CrS13), la majeure partie des aciers inoxydables sont des nuances austénitiques (301 ; 304 ; 316L ; 904L ; ...) contenant en plus des 13% minimal de chrome, du nickel pour stabiliser l'austénite à la température ambiante et retarder la formation de martensite d'écrouissage sous contrainte (effet TRIP) et du molybdène pour la tenue à la corrosion en milieu chloré, sulfurique ou en présence d'acides organiques.

On retrouve beaucoup d'aciers inoxydables austénitiques pour fabriquer des boîtiers, des bracelets, fermoirs et autres éléments (platines, cames, couronnes, ...). L'acier 301 est, quant à lui, utilisé pour les pièces ressorts.

Pour des questions de bio-compatibilité et surtout de relargage de nickel, la nuance 904L (X 1 NiCrMoCu 25 20 5) plus riche en chrome permet d'optimiser le pouvoir cicatrisant de la couche de chrome protectrice qui renforce son effet barrière à la diffusion du nickel. Cette nuance a donc supplanté le 316L (X2CrNiMo17-12-2) chez plusieurs grandes manufactures d'horlogerie au niveau des boîtiers et bracelets. De plus, la tenue à la corrosion est meilleure que les nuances 316 ou 304.



Mai 2016

L'acier inoxydable austénitique est caractérisé par sa bonne résistance à la corrosion, sa facilité de mise en forme, sa couleur, son rendu esthétique selon le choix de la terminaison (poli, satiné, microbillé) et son caractère non magnétique. Cependant, les états de surfaces des habillages perdaient plus ou moins rapidement de leur éclat initial, cette dégradation est à associer à la faible dureté de ces nuances (250HV pour un 316L).

Pour remédier à ce constat, il a fallu développer diverses techniques de durcissement de surface sans dégrader la tenue à la corrosion de ces alliages. On y trouve des traitements thermochimiques et des traitements par implantation ionique ou assistés Laser.

Pour ne détailler qu'une famille, citons les procédés thermochimiques (telles que la nitruration avec la diffusion de l'N, la cémentation avec la diffusion du C ou la nitrocarburation avec la diffusion cumulée N+C) des aciers inoxydables austénitiques qui ont pour objectif de former une solution solide d'insertion de carbone dans l'austénite (appelée également phase S), tout en évitant la formation de précipités de carbures de chrome Cr_{23}C_6 aux joints de grains. Ce traitement permet d'atteindre une dureté proche de 1200HV en surface. Ce type de traitement peut être complété par la mise en place d'un dépôt « couche mince » dur par PVD ou PA CVD dont l'adhérence nécessite un substrat à dureté élevée.

Cette modification microstructurale à la surface de l'alliage a permis aux aciers inoxydables austénitiques d'être l'un des matériaux incontournables dans le monde de l'horlogerie.

a) Les alliages légers (Ti ou Al)

Les matériaux ultralégers intéressent aussi le monde de l'horlogerie. L'aluminium et le magnésium sous forme d'alliage procurent des matériaux à faible densité, résistant à la corrosion, facile de mise en forme, amagnétique et de bel aspect de surface. Sous la forme de bandes minces de précision, les Lamineries MATTHEY livrent fréquemment l'alliage AlMg_3 (AW 5754) pour des applications dans l'horlogerie. On trouve également certaines pièces en Al-Li, alliages développés pour l'aéronautique.

Plus en marge, on parle également de matériau composite : « l'Alusic », réalisé par centrifugation, qui se compose d'une matrice en Al-Si avec des carbures de silicium (SiC). Grâce au mode d'élaboration, les particules de SiC , plus lourdes, sont entraînées vers l'extérieur de la pièce pour en former l'élément de renfort selon une répartition volumique homogène. Ce matériau est utilisé pour la fabrication du boîtier de la montre RM 09, qui ne pèse que 30 grammes, de Richard MILLE.

Le titane, malgré un mauvais comportement tribologique à nu, est de plus en plus utilisé compte tenu de ses propriétés mécaniques élevées et de son excellente tenue à la corrosion (atmosphérique, saline, l'humidité ou par la sueur ou les cosmétiques). Il est de plus léger,



Mai 2016

amagnétique et sa couleur est très proche de celle de l'or, sous la forme de nitrure. Au début, ce métal était surtout utilisé pour l'habillage, sans doute à cause de sa ductilité, mais plus tard, quelques fabricants de montres ont osé l'utiliser pour la confection des mouvements. Deux fois moins lourds et deux fois plus résistants que l'acier inoxydable, le titane et les autres métaux du même groupe comme le zirconium, le ruthénium, ainsi que le hafnium figurent aujourd'hui dans les mouvements de montres mécaniques.

b) Focus sur les matériaux pour les ressorts spiraux

Le problème du spiral thermocompensé mécaniquement a été résolu par l'utilisation d'alliage type **INVAR** (alliage de fer (64 %) et de nickel (36 %) dont la propriété principale est d'avoir un coefficient de dilatation très faible) et **ELINVAR** (un alliage d'acier avec 36% de nickel et 12 % de chrome caractérisé par une très faible variation de son module de Young avec la température).

Cependant il restait à régler le caractère magnétique de ces alliages ; pour cela il a été développé des alliages **Nb-18%Zr**. Des solutions à base de titane ont également été étudiées car il est possible d'obtenir des limites d'élasticité relativement élevées (~2200MPa) avec les alliages beta type **Beta C** ou **Beta III**.

De plus, par rapport à un acier et pour une force donnée, la déformation associée sera beaucoup plus importante compte tenu de la faible valeur du module d'Young (~75GPa pour les alliages de titane en comparaison au 210GPa pour les alliages Fe-C).

Pour les « ressorts-moteur », caractérisés par une réserve de marche limitée et un couple variable durant son utilisation, on peut trouver des alliages base cobalt (**CoNiCr**, exemple le NIVAFLEX avec ou sans Be) ou encore l'acier inoxydable austénitique **18/8**.

c) Le silicium

On connaissait déjà l'utilisation du silicium monocristallin dans le domaine de la micro-électronique et principalement avec les semi-conducteurs et l'utilisation de wafer en silicium, le voici qu'il entre par la grande porte dans le monde de la haute Horlogerie au milieu des années 2000.

Cette arrivée est directement liée aux progrès réalisés dans la technologie de gravure réactive ionique profonde ou gravure plasma (DRIE : Deep Reactive Ion Etching, basée sur la technique de masquage photo lithographique) utilisée dans un premier temps en micro-électronique pour « sculpter » les wafers.

Cette dernière permet aujourd'hui la réalisation, dans les trois dimensions, de composants d'un seul tenant précis au micron. Les formes obtenues sont complètement nouvelles ce qui permet de réfléchir à de nouveaux design impossible à obtenir jusqu'à maintenant par les

**Mai 2016**

modes d'élaboration traditionnels. Juste pour donner un exemple, il a été possible de fabriquer des fourchettes d'ancre monobloc dont l'extrémité n'a plus besoin d'être équipée d'un dard.

Le silicium est maintenant utilisé dans la fabrication d'organes oscillants (balancier-spiral) et d'échappements (ancre et roue d'ancre). Les principales caractéristiques de ce métalloïde qui en font un matériau de choix, sont :

- Sa faible densité (2,33),
- Sa très bonne tenue à la corrosion avec la présence de son oxyde protecteur (SiO_2),
- Son très bon comportement tribologique vis-à-vis des matériaux métalliques qui justifie son utilisation dans des systèmes non lubrifiés. Son utilisation sans revêtement permet au produit en silicium de conserver son excellente aptitude tribologique tout au long de sa mise en oeuvre, excepté les problèmes d'abrasion.

A cela s'ajoutent, bien entendu, son caractère amagnétique et des propriétés mécaniques honorables et l'ensemble des possibilités que peuvent offrir des oxydations sélectives sous vide sur ce type de matériau.

II. CONCLUSION

Après cette incursion dans les complications horlogères, on se rend compte que cette activité est extrêmement dynamique et que les matériaux tiennent une place importante dans cette créativité puisque un choix judicieux permet de simplifier les mécanismes des montres.

Vous comprenez maintenant les raisons pour lesquelles le **METALLO CORNER** s'est intéressé à ce domaine d'activité de haute volée. Nous n'avons que très peu évoqué les procédés de fabrication, mais sachez que l'on retrouve comme dans de nombreux secteurs d'activités : le polissage, des traitements thermiques (recuit, trempe et revenu), des traitements de surface (nickelage, dorage, rhodiage), du perlage, du microbillage, du bleuissement, du roulage, du taillage, de l'usinage LASER (découpe, gravure, perçage, marquage, texturation de surface : Gravure des cadrans et des bracelets, découpe des aiguilles ; ...) de l'usinage par électroérosion, sans oublier le décolletage fin (diam: 0.2 - 10 mm), le micro découpage, le micro-étampage ; le micro tréfilage dont la maîtrise est fortement représentée dans la vallée de l'Arve.

Nous avons fait la démarche d'aller au cœur de mouvements de montres de haute Horlogerie et nous vous invitons à retrouver ces pièces sur le site des grandes manufactures horlogères Suisse.

Bon temps à tous et RDV en juillet avec la fabrication additive !

Métallo Corner remercie la manufacture BLANCPAIN pour la documentation technique et les photos mis à disposition