

TRANSCRIPTION DU MODULE FILIPÉ « INTRODUCTION AUX MICROSTRUCTURES »

Table des matières

SÉQUENCE 1 : Présentation.....	1
SÉQUENCE 2 : Phases	2
SÉQUENCE 3 : Joints de grains.....	2
SÉQUENCE 4 : Joints de phase.....	2
SÉQUENCE 5 : Énergie d'un point de phases.....	3
SÉQUENCE 6 : Dendrites	3
SÉQUENCE 7 : Eutectique	3
SÉQUENCE 8 : Eutectiques : morphologie.....	3
SÉQUENCE 9 : Courbes TTT	4
SÉQUENCE 10 : Courbes TRC.....	4
SÉQUENCE 11 : Transformation martensitique.....	5
SÉQUENCE 12 : Comparaison entre transformations displacive et diffusive.....	5
SÉQUENCE 13 : Exemple de transformation martensitique.....	5
SÉQUENCE 14 : Martensites en plaquettes.....	5
SÉQUENCE 15 : Dureté de la martensite	6
SÉQUENCE 16 : Propriétés des matériaux métalliques	6

SÉQUENCE 1 : Présentation

L'objet de cette présentation est de vous sensibiliser au vocabulaire des microstructures.

Quand on prend un objet manufacturé, donc par exemple ici un avion, il est constitué de différentes pièces. Chacune de ces pièces est constituée d'un matériau différent. Donc ici je vous ai donné deux exemples : les pièces du moteur constitué d'un alliage TiAl et les ailes qui sont constituées d'un alliage d'aluminium.

Si on s'intéresse aux pièces du moteur, vous en voyez la microstructure ici, sur l'image numéro 2, et cette microstructure est constituée de grains, donc ce sont tous les contrastes colorés que vous voyez sur cette image.

Si on s'intéresse de façon plus fine à l'intérieur de cette microstructure, nous voyons des défauts qui sont les dislocations.

En ce qui concerne l'aile et l'alliage d'aluminium, je vous montre ici une image en microscopie électronique en transmission, où vous voyez que ce matériau est en fait biphasé. Nous voyons en gris la matrice d'aluminium et puis des petits précipités qui vont durcir l'alliage.

Sur la dernière image, une image qui vous montre les colonnes atomiques d'aluminium et puis, de façon plus fine, le précipité qui distord la maille. Donc ce sont tous ces objets et toutes ces informations que je vais essayer de vous expliquer pendant ce cours.

SÉQUENCE 2 : Phases

Donc ici je voudrais d'abord vous introduire la notion de phase. Quand on mélange deux éléments A et B, en fait ils ne se mélangent pas de façon très simple, on peut avoir plusieurs réactions qui vont dépendre de la température.

J'illustre cela par le diagramme de phase aluminium-cuivre et nous nous intéressons ici plus particulièrement au côté riche en cuivre.

Donc quand on mélange de l'aluminium et du cuivre, on va pouvoir obtenir soit une solution solide d'aluminium, c'est le domaine hachuré α à gauche de l'écran. Cette solution solide est constituée d'un mélange désordonné d'atomes d'aluminium et de cuivre sur le réseau cubique à faces centrées du cuivre.

Si on est un peu plus riche en composition de cuivre, de l'ordre de 50%, on pourra avoir le composé intermétallique Al_2Cu . Ce composé, lui, est un arrangement d'atomes très déterminé sur les sites de la maille orthorhombique. Partout ailleurs, en fait, nous avons des domaines biphasés.

SÉQUENCE 3 : Joints de grains

Venons-en maintenant à la notion de joint de grains.

Sur le transparent numéro 1, je vous avais montré des grains de titane-aluminium qui étaient tous de couleur différente. L'origine de ces couleurs venait de l'orientation particulière de chacun des grains. C'est ce qui est schématisé sur ce dessin où on a un grain α avec une orientation et un grain β qui est orienté différemment. L'angle de désorientation entre les grains est l'angle Φ . Ainsi pour définir un joint de grains, il faudra connaître cet angle Φ , mais également l'orientation de la surface qui sépare les grains α et β .

Certains joints de grains ont des propriétés particulières suivant qu'ils vont être transparents aux dislocations, ils seront alors cohérents, c'est-à-dire que les plans d'un grain vont se continuer dans l'autre grain, mais en général ils sont plutôt semi cohérents ou incohérents, c'est-à-dire que les plans ne seront pas continus d'un cristal à l'autre, ils seront alors des obstacles très efficaces pour les dislocations.

Un type de joint particulier est les joints de macle. Ces joints sont constitués en fait d'une symétrie du cristal. En effet si l'on représente la structure cristalline par l'empilement des plans denses, on peut les empiler suivant une séquence ABCABCABC. Un joint de macle va inverser cette séquence et continuer l'empilement à l'envers. On aura alors un empilement CBACBACBA.

SÉQUENCE 4 : Joints de phase

Dans ces premiers joints, nous avons essentiellement parlé d'orientation cristalline, mais pas de composition chimique. Or, de part et d'autre du joint, la composition chimique peut être différente et de la même façon, on pourra avoir, de part et d'autre donc de ces désordres chimiques, des joints qui seront cohérents, donc c'est ce qui est le cas sur le schéma (a) ou le schéma (b) et c'est ce qui était le cas dans le petit précipité que je vous avais montré sur le premier transparent. Vous voyez donc sur l'image de droite le réseau cristallin de l'aluminium et ses colonnes atomiques et en encart un agrandissement de ce petit précipité et vous voyez que les plans de l'aluminium se continuent dans le précipité : il s'agit bien là d'un joint de phase cohérent entre l'aluminium et son précipité.

Ces joints cohérents peuvent être libres de toute contrainte ou bien ils peuvent être contraints.

Les joints de phase peuvent être également

- semi-cohérents, donc c'est ce qui est illustré ici avec la présence de dislocations dans la zone inter phase, (les dislocations sont indiquées par les flèches rouges),
- ou complètement incohérents et j'ai illustré ça par les interphases particulières de l'eutectique Aluminium- Al_2Cu où il n'y a pas de continuité cristalline entre les lamelles d'aluminium et les lamelles d' Al_2Cu qui apparaissent ici en blanc.
- En plus sur cette image d'eutectique, nous voyons deux orientations de lamelles différentes.

SÉQUENCE 5 : Énergie d'un point de phases

Ces notions de joints sont très importantes parce que ce sont eux qui vont servir d'obstacles très forts aux dislocations et ce sont ces dislocations qui sont responsables des propriétés plastiques ou de rupture des matériaux. Également, ces joints vont avoir un effet important dans les matériaux parce qu'ils sont la source de stockage d'énergie.

Cette énergie a deux origines :

- soit une origine élastique, nous avons vu que quand les joints étaient semi cohérents il existait des déformations, donc des contraintes aux interfaces,
- une autre origine est une origine chimique puisque nous pouvons avoir des compositions différentes de part et d'autre de ces interfaces.

SÉQUENCE 6 : Dendrites

Nous allons voir maintenant, plus particulièrement, la morphologie des phases ainsi que les transformations de phase qui peuvent avoir lieu dans les matériaux. Donc la première morphologie que je vais vous présenter est une morphologie que l'on va voir apparaître dans les matériaux après la solidification.

Quand on solidifie un matériau, on va avoir une interface entre le liquide et le solide qui se forme. En fonction des conditions de refroidissement, en fonction des conditions de l'avancée de l'interface solide-liquide, une instabilité peut apparaître et à ce moment-là, on va voir se développer des dendrites. Donc c'est ce même phénomène qui apparaît dans la glace qui forme les flocons de neige. Toutes les petites branches étoilées des flocons de neige sont en fait des dendrites.

Vous voyez donc sur ces images des petites étoiles, ce sont des dendrites d'alliage de Nickel que l'on obtient dans un super alliage. Dans un monocristal, toutes ces dendrites ont la même orientation. Sur l'image de droite, nous voyons plusieurs populations de dendrites orientées de façons différentes et donc ici il s'agira d'un polycristal. Dans un grain ou dans une zone de dendrites de même orientation, l'orientation cristalline est partout la même.

Par contre, entre une dendrite et la région inter dendritique, nous pourrions avoir des zones de compositions chimiques différentes puisque ces régions inter dendritiques sont plus riches en soluté.

SÉQUENCE 7 : Eutectique

Cette solidification dendritique apparaît lorsque l'on solidifie dans un domaine biphasé entre du liquide et la solution solide α .

Si l'on choisit un autre point de solidification, par exemple à la composition, dans le cas de Aluminium-Cuivre, de 37%, on aura une solidification eutectique. L'eutectique est un équilibre très particulier où un liquide va se transformer en un solide 1 et un solide 2. Cette transformation se fait à température constante. Dans le cas d'Aluminium Cuivre, le solide 1 est une solution solide α qui contient de l'aluminium et un peu de cuivre dispersé sur le réseau et puis la phase θ , Al_2Cu , qui est un intermétallique donc avec ses atomes d'aluminium et de cuivre bien disposés sur un réseau orthorhombique.

SÉQUENCE 8 : Eutectiques : morphologie

L'intérêt de ces eutectiques est de présenter une température de solidification plus basse qu'aux autres compositions.

Ces eutectiques peuvent avoir différentes morphologies,

- suivant la composition chimique des alliages,
- suivant la fraction volumique des phases impliquées,
- suivant la structure cristalline.

Je vous présente ici différentes morphologies d'eutectiques, vous avez déjà vu l'alliage eutectique lamellaire Al- Al_2Cu , c'est l'image de gauche et je vous présente également un eutectique plutôt facetté

Aluminium-Silicium. Sur l'image on voit un gros grain de silicium primaire noté Si p et puis des petites aiguilles de silicium eutectique dans une matrice blanche d'aluminium eutectique.

Je présente également une image de la perlite qui n'est pas un eutectique mais un eutectoïde puisqu'il s'agit d'une transformation à partir d'une phase solide. Ici la réaction s'écrit : 1 solide 1 (donne) un solide 1 + un solide 2. Dans ce cas il s'agit également d'un eutectoïde lamellaire.

SÉQUENCE 9 : Courbes TTT

Donc pour prédire les phases, nous avons à notre disposition différents outils : les diagrammes de phases qui permettent de prévoir les phases à l'équilibre, mais aussi d'autres outils que je vais vous présenter maintenant.

Donc tout d'abord voyons les courbes TTT pour Temps Températures Transformation. Ces courbes se présentent de la façon suivante : nous avons deux axes,

- le temps en abscisse
- et la température en ordonnée
- et puis des courbes en nez qui vont essentiellement représenter la possibilité de transformation diffusive dans les matériaux.

C'est pour cela que la notion de temps est très importante.

Ces courbes se lisent de la façon suivante : si l'on fait un maintien à une température donnée pendant un temps donné, on saura quelle phase on obtient et en quelle fraction volumique.

Voyons un exemple sur l'acier 100C6 qui contient 1% de carbone et 1,5% de chrome.

- Si l'on fait un maintien à 500 degrés pendant 5 ou 10 secondes, on aura fait apparaître 1% de ferrite ou de perlite.
- Si ce maintien est prolongé pendant 1 minute, nous aurons 100% de ces phases : la transformation de l'austénite en ferrite et perlite sera complète.
- Si ce maintien est réalisé à plus basse température, par exemple à 400 degrés, les phases que nous obtiendrons seront la bainite constituée de ferrite et de cémentite et cette transformation ne sera complète qu'au bout de 2 minutes.

Encore une fois, ce diagramme permet de prévoir les phases que l'on obtiendra par des phénomènes de diffusion.

SÉQUENCE 10 : Courbes TRC

Le deuxième outil est constitué par les courbes TRC qui sont, elles, des courbes en refroidissement continu. On va alors faire un traitement d'homogénéisation à haute température de nos alliages et puis on aura l'information de quelle phase on obtiendra suivant la vitesse ou les conditions de refroidissement.

Donc, si l'on s'intéresse toujours au même acier 100C6, on voit ici sur le schéma différentes possibilités de microstructures suivant que

- l'on refroidi vite, le chemin N°1,
- moins vite, N°2
- ou très lentement, le chemin N°3.

Nous allons commenter d'abord les chemins 2 et 3. Pendant le chemin 2, les premières phases que l'on va rencontrer seront la bainite, ainsi il sera possible lors d'un refroidissement relativement rapide

d'obtenir directement cette bainite. Si le refroidissement est plus lent, c'est le chemin N°3, nous obtiendrons de la ferrite et de la perlite mais pas de bainite.

Le chemin 1 est particulier puisqu'il ne met pas en jeu de transformation de phase diffusive, mais une transformation de phase displacive, caractérisée par le point de transformation M_s .

SÉQUENCE 11 : Transformation martensitique

Je viens de parler de transformations de phase displacives, en fait il s'agit de la transformation martensitique. Les caractéristiques de cette transformation sont les suivantes :

- il s'agit d'une transformation hétérogène en phase solide.
- Cette transformation est athermique, c'est-à-dire qu'elle ne va pas dépendre de la température.
- Elle s'effectue avec une interface cohérente ou semi cohérente entre les phases
- et surtout elle est displacive dans le sens où il s'agit d'un cisaillement de la structure.

Par rapport à une transformation diffusive, où on peut imaginer que tous les atomes bougent un petit peu mais sur des distances assez longues, dans la transformation displacive, tous les atomes bougent mais d'une distance très courte inférieure à une distance interatomique.

SÉQUENCE 12 : Comparaison entre transformations displacive et diffusive

Sur ce tableau sont rassemblées toutes les différences qu'il existe entre les transformations de phase displacives et les transformations de phase diffusives.

Je ne vais pas commenter toutes ces différences, il faut savoir que ces transformations de phase apparaissent dans de nombreux matériaux et ne sont pas propres uniquement aux aciers. Donc d'autres alliages métalliques sont concernés, par exemple les alliages cuivre-aluminium, mais également des matériaux plastiques comme certains polymères et également des céramiques.

La principale caractéristique des phases obtenues par ce type de transformations est d'avoir souvent des propriétés mécaniques particulières à savoir que cette phase martensite est très dure.

SÉQUENCE 13 : Exemple de transformation martensitique

Pour vous donner un exemple un peu plus concret, voyons le cas des aciers.

Donc dans les aciers, l'austénite se transformerait en ferrite ou en perlite lors de transformations diffusives mais si la transformation displacive a lieu, la phase obtenue s'appelle la martensite.

Pour obtenir cette transformation de phase, il faut refroidir très rapidement l'austénite d'un acier. Cette transformation martensitique est caractérisée par un point M_s , pour martensite start, qui est le début de la transformation martensitique. Cette transformation martensitique sera complète dans un certain intervalle de température. La microstructure obtenue est constituée d'aiguilles qui vont s'enchevêtrer les unes dans les autres.

SÉQUENCE 14 : Martensites en plaquettes

Pour vous montrer concrètement à quoi ressemble cette martensite, voilà des images de martensite en plaquette dans un acier qui contient beaucoup de Nickel et dont vous voyez, sur l'image A, toutes ces aiguilles de martensite. Ici la transformation n'est pas complète, elle concerne une fraction de 30% du matériau.

On peut, si l'on travaille sous contraintes, essayer d'orienter de façon préférentielle ces aiguilles de martensite et donner donc des propriétés texturées à notre matériau.

La morphologie de cette martensite, en fait, va dépendre de la composition en carbone de notre acier.

- Si l'acier contient entre 0 et 0,6% de carbone, la morphologie de la martensite sera typiquement de la martensite en lattes, dont vous voyez des images sur la partie gauche de l'écran.
- Si l'acier contient plutôt plus de 1% de carbone, on aura de la martensite en plaquettes.
- Si l'acier est intermédiaire, nous pourrions avoir coexistence de ces deux morphologies de martensite.

SÉQUENCE 15 : Dureté de la martensite

Tout à l'heure, j'ai parlé des propriétés particulières de la martensite et vous voyez ici comment évolue la dureté de la martensite des aciers en fonction de leur teneur en carbone.

Pour les aciers qui contiennent peu de carbone, la martensite n'est pas très dure, à peine plus dure que la ferrite.

Mais dès que l'on augmente la teneur en carbone de l'acier, la martensite devient vraiment très dure et on a un maximum de dureté à partir de 1% de carbone.

Ceci vient du fait que le carbone dans la martensite apporte des contraintes élastiques dans la maille et donne une dureté particulière aux matériaux.

SÉQUENCE 16 : Propriétés des matériaux métalliques

Donc nous en arrivons à la fin de l'exposé. Je vous ai présenté les différents paramètres qui définissent la microstructure des matériaux et ces paramètres seront un des grands critères de choix pour l'utilisation des matériaux.

Mais sur ce dernier transparent, je vous présente quels seront également tous les autres choix dont il faudra tenir compte pour choisir un matériau pour une application donnée. Parmi ces choix, il faudra s'intéresser :

- aux propriétés mécaniques, comme le module élastique, la limite d'écoulement, la ténacité ou la tenue en fatigue,
- les propriétés thermiques,
- les propriétés d'usure ou de corrosion ou d'oxydation qu'il ne faudra pas oublier,
- mais également le coût des matériaux.
- Et de plus en plus, puisque nous essayons de faire beaucoup d'économies d'énergie pour les matériaux, il faut s'intéresser à leur densité.