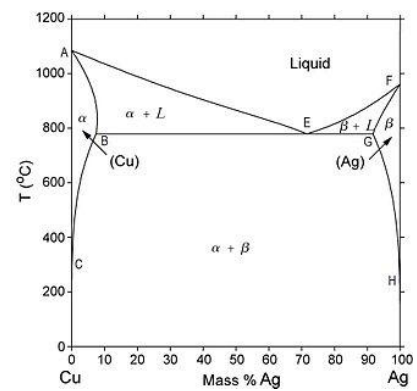


Transformations de Phases

Première Master-Physique des Matériaux



Y. I. BOUREZG

Table des matières



I - Chapitre I : Généralités sur les transformations de phases	3
1. Classification de transformations de phases	3
2. Phénomène de recristallisation	4
3. Phénomène de précipitation	4
4. Cinétique de transformation de phase	5
5. Les traitements thermiques	6
6. Activité d'apprentissage du chapitre I	6
6.1. <i>Exercice</i>	7
6.2. <i>Exercice</i>	7
6.3. <i>Exercice</i>	7
II - Exercice : Évaluation finale (liste d'exercices)	8
1. Exercice	9
2. Exercice	10
3. Exercice	11
Solutions des exercices	12

Chapitre I : Généralités sur les transformations de phases

Classification de transformations de phases	3
Phénomène de recristallisation	4
Phénomène de précipitation	4
Cinétique de transformation de phase	5
Les traitements thermiques	6
Activité d'apprentissage du chapitre I	6

Les transformations de sont des réactions qui s'accompagnent d'une modification très importante dans la nature ou/et dans le nombre de phases existantes dans la microstructure du matériau.

L'étude thermodynamique des phases nous donne la composition de celles-ci à l'équilibre thermodynamique, mais elle nous donne aucune indication, ni sur la cinétique de transformation de phase, ni sur la microstructure formée (c-à-d la taille et la morphologie des phases en particulier).

Selon le second principe de la thermodynamique, pour qu'une phase puisse s'effectuer, une force motrice lui est nécessaire. Celle-ci se traduit par la diminution de l'enthalpie libre du système (ΔG), lors du passage d'un état donné à un autre. L'état stable d'un système étant celui pour lequel l'enthalpie libre est minimale ($dG/dT = 0$).

La transformation d'une phase dans une autre se fait en général par un mécanisme de germination (apparition de nouveaux germes) suivie d'un croissance.

1. Classification de transformations de phases

Les transformation de phases présentent trois catégories:

1. Diffusion sans changement de la composition et le nombre de phases présentes

Comme :

- Solidification du Fer pur, (Fe liquide nous donne Fe (δ) (à 1538°C))
- Recristallisation
- Transformation allotropique

2. Diffusion avec changement de composition et de nombre de phases

Comme :

- Transformation eutectoïde du Fer, (Fe (δ) nous donne Fer (α)+Fe₃C (à 727°C))
- Transformation de précipitation, (Mg nous donne Mg₁₂Nd+Mg (à 250°C))

3. Diffusion faible produit une phase métastable par des petits déplacements de tout les atomes dans la structure sans changement de la composition des phases

Comme :

- Transformation martensitique du Fer, (Fer (δ) nous donne Fer (α) (à 912°C))

2. Phénomène de recristallisation

Une *déformation plastique* conventionnelle ou sévère d'un matériau(soit métallique), provoque une *restauration* à l'échelle des grains et par la suite une *recristallisation* de la microstructure du matériau déformé (Microstructure recristallisée)

Définition : Restauration

En général, la restauration est une opération de réarrangement des sous-joints et d'annihilation de dislocations au cours d'un traitement thermique sans aucune modification dans la microstructure. La restauration accompagnée par une relaxation de l'énergie stockée.

Définition : Recristallisation

La recristallisation est un phénomène de formation et de migration des joints de grains sous l'effet de l'énergie stockée. La recristallisation se commence par une germination et suivie par une croissance.

La figure ci-dessous illustre les différentes étapes de recristallisation:

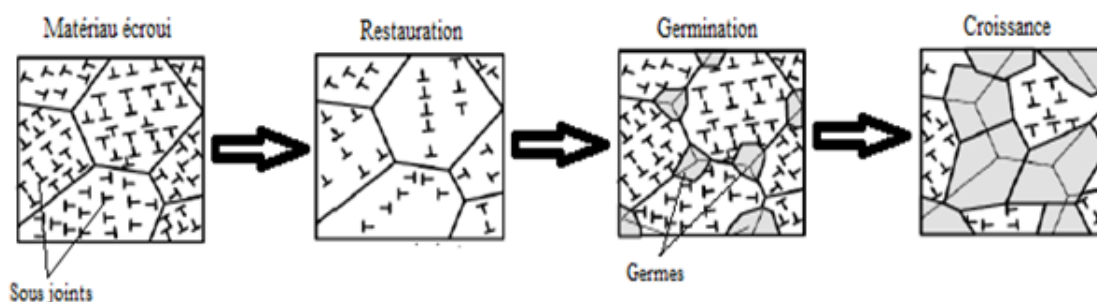


Illustration schématique des différentes étapes de recristallisation

Selon l'ordre du processus de recristallisation, avant ou après les opérations de mise en forme, on peut distinguer deux types de recristallisation: Statique et Dynamique

3. Phénomène de précipitation

Un alliage monophasé (phase α à titre exemple) à une température bien déterminée, peut devenir biphasé ($\alpha+\beta$) à des température plus basses (à cause de redistribution des atomes (diffusion) sous l'effet de l'énergie motrice qui est la température). Donc, la précipitation par définition est une transformation à l'état solide avec augmentation du nombre de phases sous l'effet du processus de diffusion. La figure ci-dessous représente le domaine monophasé et biphasé d'un alliage (A-%B) comme suivant:

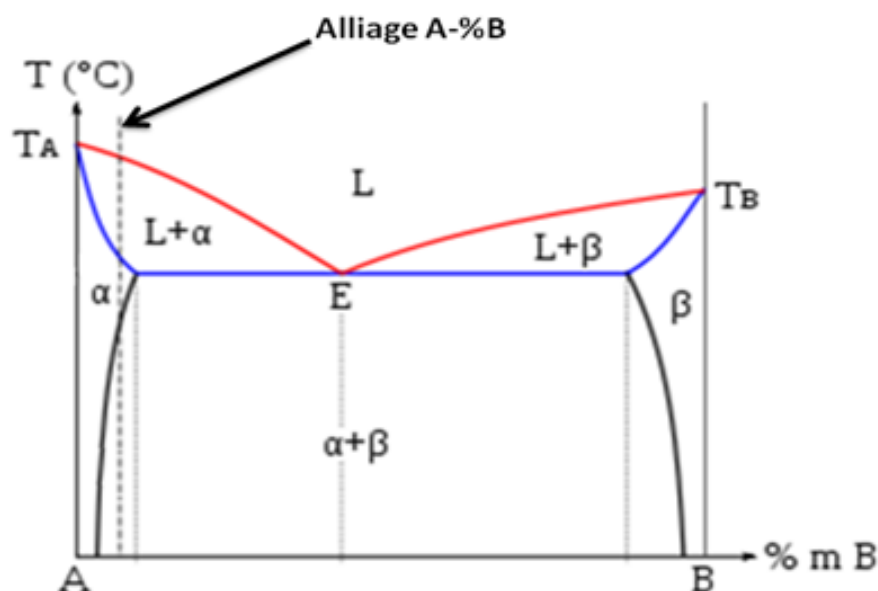


Diagramme de phase binaire montrant les différents domaines

4. Cinétique de transformation de phase

En 1941, Avrami a proposé une équation permettant de calculer le degré d'avancement de la transformation d'une nouvelle phase en fonction de temps comme suivant:

$$X = 1 - \exp(-kt^n)$$

où:

X (ou f): C'est le fraction de transformation (il varie de 0 à 1)

k: Constat du temps.

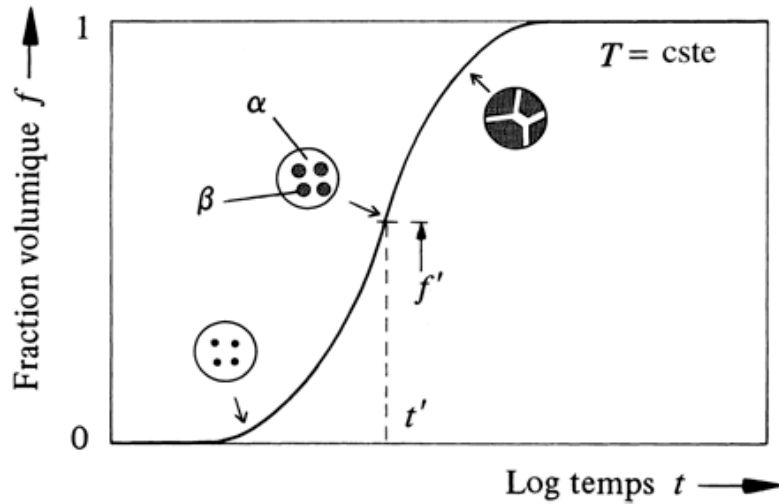
t: Temps de recuit.

n: Coefficient d'Avrami qui caractérise la procédure de transformation.

Le développement d'une nouvelle phase β au sein de la phase mère α se présente de la manière suivante (voir figure au dessous):

- Apparition des nouveaux germes de β
- Croissance des germes (à t le degré d'avancement est 50%)

- Fin de croissance (La phase β est totalement transformée).



Fraction de transformation d'une nouvelle phase (β) en fonction du temps

Afin d'évaluer l'énergie d'activation, E de transformation lors d'un traitement isochrone, telles que la recristallisation et la précipitation, l'énergie d'activation de celles-ci pourrait être déterminée en utilisant trois méthodes analytiques, Kissinger, Boswell et Ozawa, selon les équations suivantes respectivement :

$$\text{Kissinger: } \ln(V/T_p^2) = C - E/RT_p \quad \text{Boswell: } \ln(V/T_p) = E/RT_p \quad \text{Ozawa: } \ln(V) = E/RT_p$$

Où: V est la vitesse de chauffage, T_p est la température correspondant au maximum du pic, C un constant et R est la constante des gaz parfaits.

5. Les traitements thermiques

Pour obtenir des matériaux possédants des propriétés spéciales, on a recours à l'utilisation de traitement thermique, parmi eux:

- *Mise en solution solide (Homogénéisation)*: Elle consiste à maintenir de certain temps un alliage dans le domaine solution solide afin de faire diffuser les éléments de solutés et uniformiser leurs concentrations dans la structure cristalline
- *Traitement de revenu (recuit)*: Il a pour but de faire précipiter des nouvelles phases décrites par le diagramme de phase. (Parfois, on le fait afin d'améliorer certains propriétés, telles que les mécaniques).
- *Traitement de dissolution*: Après avoir fait précipiter des phases par le traitement de revenu, il est possible de les ré-dissoudre

6. Activité d'apprentissage du chapitre I

Exercice	7
Exercice	7
Exercice	7

6.1. Exercice

[solution n°1 p.12]

Les transformations de phases présentent combien-elle une catégorie ?

- 1
- 2
- 3

6.2. Exercice

[solution n°2 p.12]

Quelle est l'équation qui décrit le degré d'avancement d'une transformation de phase ?

- Kissinger
- Avrami
- Ozawa

6.3. Exercice

[solution n°3 p.12]

Quels sont parmi ces termes, qui décrivent les étapes de recristallisation :

- Restauration
- Dissolution
- Croissance
- Germination

0. Exercice

C'est quoi la phénomène de restauration d'un matériau métallique (Recovery en anglais)

- réarrangement des grains
- réarrangement des dislocations

0. Exercice

La recristallisation dans les matériaux métalliques est

- Une germination des petits grains suivie par une croissance
- Formation et migration des joints à grandes angles (HAGB)
- Formation de joints de grains

0. Exercice

La transformation eutectique est



Solutions des exercices



> Solution n° 1

Exercice p. 7

Les transformations de phases présentent combien-elle une catégorie ?

- 1
- 2
- 3

> Solution n° 2

Exercice p. 7

Quelle est l'équation qui décrit le degré d'avancement d'une transformation de phase ?

- Kissinger
- Avrami
- Ozawa

> Solution n° 3

Exercice p. 7

Quels sont parmi ces termes, qui décrivent les étapes de recristallisation :

- Restauration
- Dissolution
- Croissance
- Germination

> **Solution n° 4**

Exercice p. 8

Exercice

C'est quoi la phénomène de restauration d'un matériau métallique (Recovery en anglais)

- réarrangement des grains
- réarrangement des dislocations

Exercice

La recristallisation dans les matériaux métalliques est

- Une germination des petits grains suivie par une croissance
- Formation et migration des joints à grandes angles (HAGB)
- Formation de joints de grains

Exercice

La transformation eutectique est

Le liquide se transforme en deux phases solides (alpha et beta à titre exemple)