

1- Diagrammes d'équilibre: Notions et généralités

2- Diagrammes d'équilibre: Microstructure

3- Diagrammes d'équilibre: Alliages fer-carbone

4- Transformations isothermes et anisothermes

5- Traitements thermiques, thermo-mécaniques et chimiques des alliages

6- Diffusion et durcissement structurale des alliages

7- Corrosion: Mécanismes et préventions

8- Rupture: Notions et généralités

Traitements thermiques, thermo-mécaniques et chimiques des alliages

Lamine HATTALI

IUT Cachan – 1^{ère} année Sciences des Matériaux

✉ lamine.hattali@u-psud.fr



Introduction

Deux traitements thermiques des aciers ont déjà été traités :

- Austénitisation,
- Trempe (par refroidissement continu)

De nombreux traitements thermiques existent, dont :

- **Le revenu**
- **Le recuit**
- La normalisation
- ...

Définition de quelques températures

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

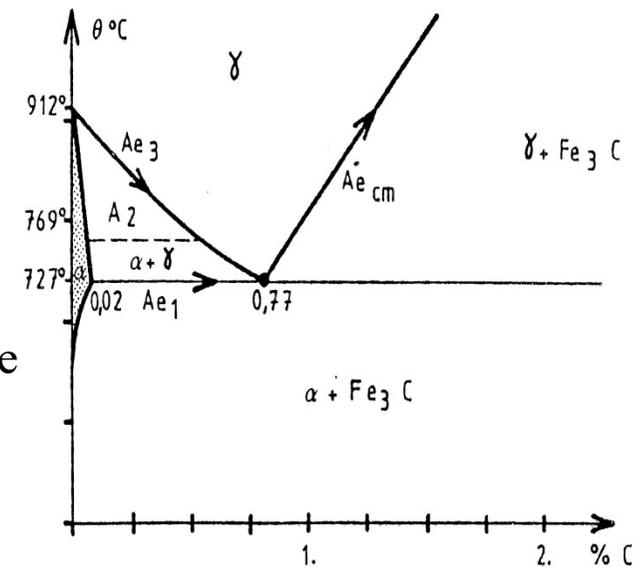
Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Lors d'un chauffage (c) :

- A_{C1} : limite inférieure d'existence de l'austénite (température de la transformation eutectoïde),
- A_{C3} : limite supérieure d'existence de la ferrite,
- A_{Ccm} : limite supérieure d'existence de la cémentite dans un acier hypereutectide.



Le revenu

Objectifs du revenu

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

□ L'état structural obtenu après développement de la transformation $\gamma \rightarrow M$ au cours d'un refroidissement continu étant généralement métastable à la température ambiante, un réchauffage permet, dans certaines conditions, de provoquer un retour plus ou moins important vers l'état d'équilibre. Ce retour constitue une phase importante des transformations des aciers connue sous le terme général de « **revenu** ».

□ Comme l'on recherche un retour vers l'état d'équilibre, il est évident que le réchauffage qui provoque le revenu ne doit pas atteindre la température à laquelle la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ peut s'amorcer.

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Objectifs du revenu

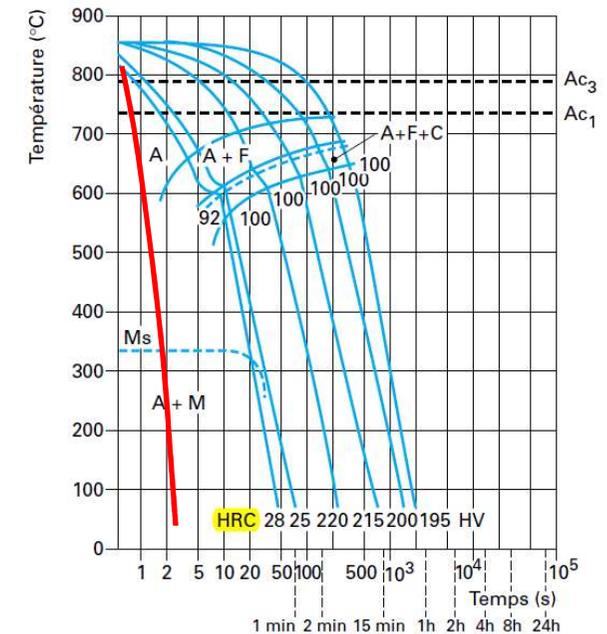
Après une trempe martensitique, l'acier obtenu possède :

- Un état de contraintes
- Une résilience K faible
- Une ductilité faible
- Allongement A% faible
- Une dureté H élevée
- Une limite d'élasticité Re élevée
- Une limite à la rupture Rm élevée

Un revenu est effectué pour :

- Revenir à un état d'équilibre
- Relâcher l'état de contraintes
- Augmenter la résilience et la ductilité (au prix d'une diminution de la dureté ...)

Courbe TRC



Nuance	Composition chimique (%)							
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Cu
45 Mn 5	0,47	1,37	0,36	0,025	0,015	0,02	0,15	0,19
Acier austénitisé à 875 °C pendant 30 min Grosseur de grain AFNOR : 11 à 12								

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

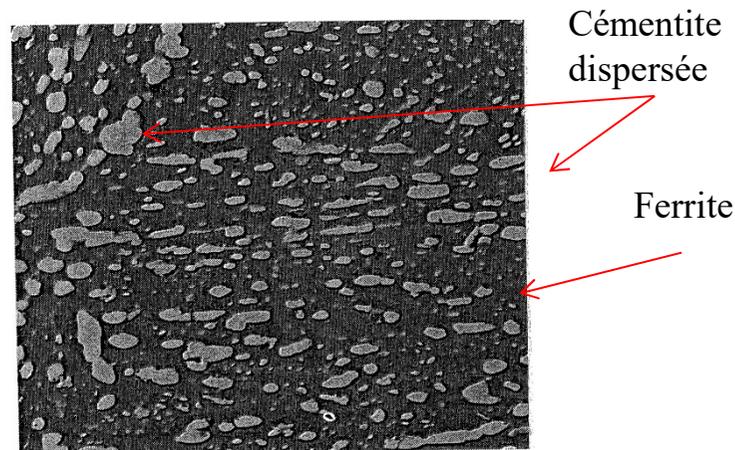
Traitements mécaniques

Traitements chimiques

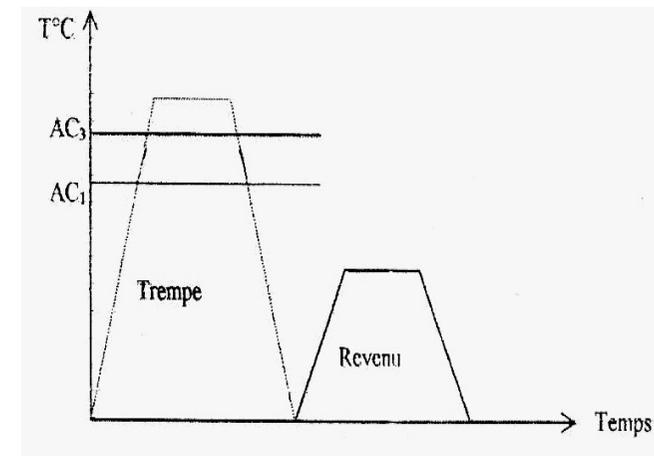
Ce qu'il faut retenir

Principe du revenu

- ❑ Consiste à réchauffer une pièce trempée, à une température $\theta_R < A_{C1}$ (entre 250°C et 650°C) pendant un temps déterminé t_R puis procédé à un refroidissement jusqu'à température ambiante .
- ❑ La martensite se dissocie en un complexe de cémentite dispersée dans du fer alpha, pour former des globules microscopiques agglomérés. On obtient une structure **martensite-revenu**, **sorbitique** ou **troostitique** suivant les températures choisies.



Structure sorbitique (Revenu à 594°C)



Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

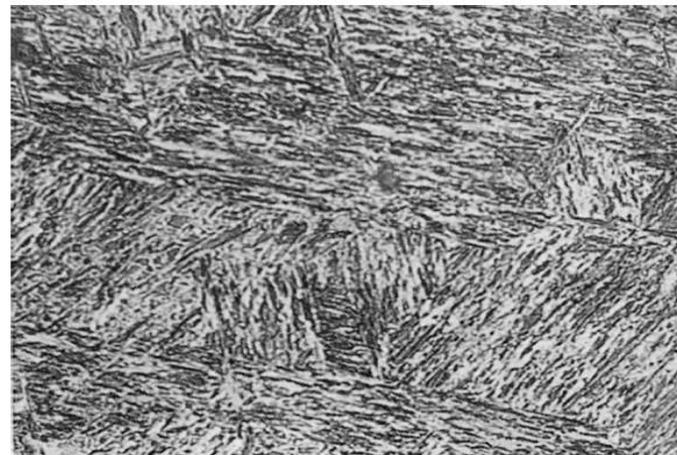
Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Différents traitements de revenu

□ Revenu à basse température

Il s'effectue vers 250°C (avec une durée entre 1 à 3 heures) et permet de diminuer les **contraintes internes**. Il transforme la martensite de trempe en **martensite de revenu**. Ce revenu augmente la résistance et améliore la ductilité sans altérer sensiblement la dureté (58 à 63 HRC), d'où une bonne tenue à l'usure. Il s'applique aux **outils de coupe** et aux **instruments de mesure** en aciers au carbone faiblement alliés.



Acier à 0,32 % C - 4,12 % Ni - 1,37 % Cr
 Traitement : 850 °C (30 min) - eau
 Attaque Nital (3 %)

Grossissement : 900

Différents traitements de revenu

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

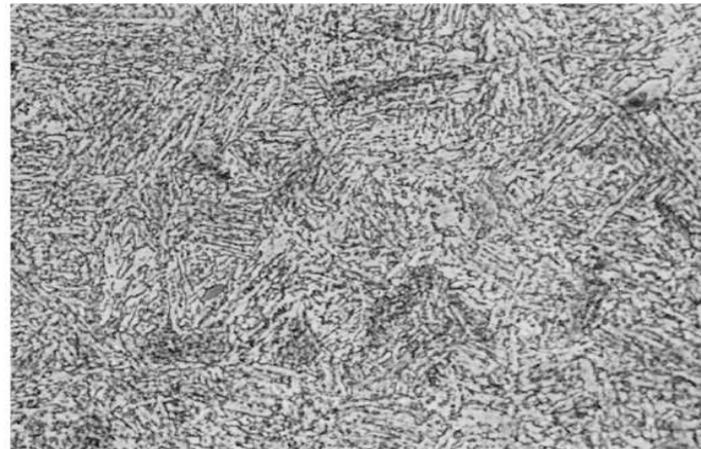
Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

□ Revenu à température intermédiaire

Il s'effectue entre 350 et 500°C et s'emploie pour **les ressorts** et les **estampes**. Il permet d'obtenir une limite élastique et une résistance à la fatigue élevées. La structure est de type **sorbite de revenu** dont les duretés varient de 40 à 50 HRC. Le refroidissement après revenu se fait à l'eau, ce qui contribue à la formation en surface de contraintes de compression résiduelles qui élèvent la limite de fatigue des ressorts.



Acier à 0,38 % C - 0,6 % Mn - 0,3 % Si

Traitement : 850 °C (30 min) - eau - 600 °C (16 h)

Attaque Nital (3 %)

Grossissement : 900

Différents traitements de revenu

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

□ Revenu à haute température

Il se fait entre 500 et 680°C, il donne à l'acier la structure **troostite de revenu** ou **sorbite grossière**. Il crée un meilleur rapport entre la résistance et la ductilité de l'acier. Il est appliquée aux **aciers de construction** à moyen carbone (0,3 à 0,5%).



Acier à 0,6 % C

Traitement : refroidissement continu à l'air sur fil à la sortie du laminoir

Attaque Nital (3 %)

Zones sombres : perlite (lamellaire, fine ou très *fine troostite*)

Zones blanches : ferrite

Grossissement : 500

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

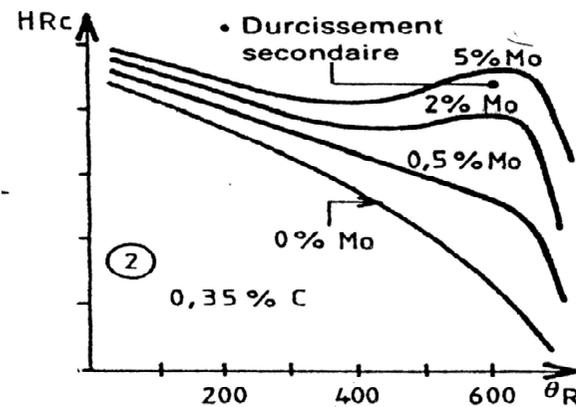
Ce qu'il faut retenir

Evolution des propriétés

Ductilité et résilience ↗, dureté ↘ sensiblement

❑ Influence de la composition chimique

- les éléments alliés retardent la chute de la dureté
- il peut exister un durcissement secondaire,
- l'association Cr-Ni-Mo (NCD) conduit à des maintiens de dureté même pour des température de revenu élevées.



❑ Influence des conditions de revenu

- Le couple (θ_R , t_R) influe fortement sur l'évolution de la dureté en fonction du temps.
- Il existe des paramètres d'équivalence temps-température

Le recuit

Principe du recuit

- ❑ Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs.

- ❑ Le recuit a pour but de :
 - Diminuer la dureté d'un acier trempé
 - Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques
 - Régénérer un métal écroui ou surchauffé
 - Homogénéiser les textures hétérogènes
 - Réduire les contraintes internes

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

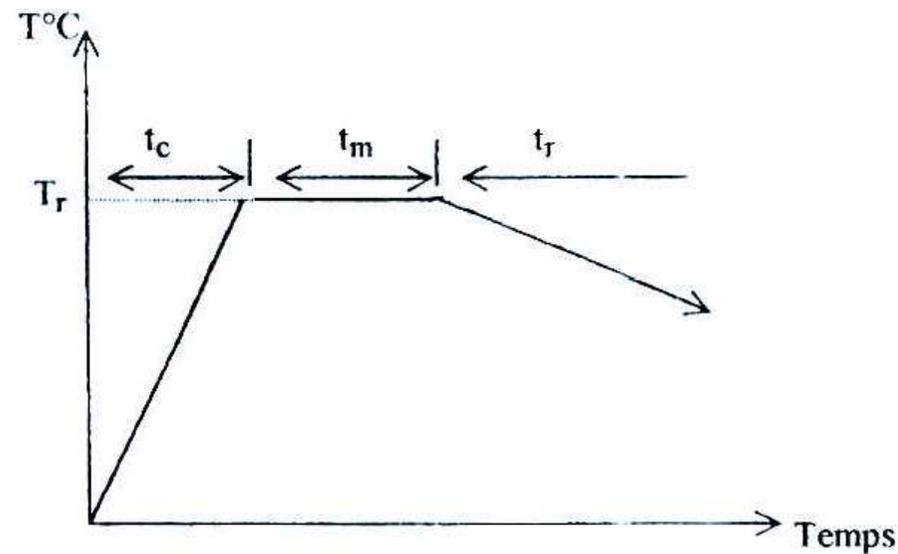
Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Principe du recuit

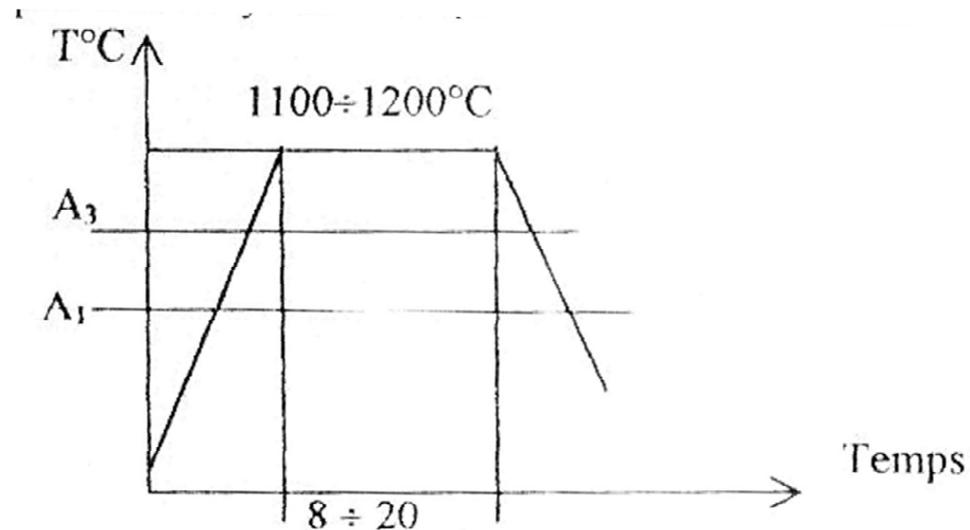
- Consiste à chauffer une pièce jusqu'à une température dite de recuit (350°C - 1200°C) qui dépend du type de recuit à réaliser pendant un temps déterminé t_R puis procédé à un refroidissement très lent généralement à l'air calme.



Différents traitements de recuit

□ Recuit d'homogénéisation (recuit de diffusion)

- Il s'applique aux **aciers bruts de coulée** et aux **aciers moulés** dans le but d'affaiblir ou éliminer la ségrégation dendritique ou inter-cristalline (lors de la solidification de l'acier, les éléments d'alliage ou le carbone sont repartis d'une façon hétérogène à l'échelle du grain austénitique).



Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Différents traitements de recuit

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Recuit de recristallisation

- Il s'applique aux matériaux ayant subi une **déformation plastique** à froid ou **un écrouissage**.

L'écrouissage d'un acier implique :

- R_e , R_m , H augmentent
- $A\%$, K diminuent

Pour restaurer les propriétés mécaniques de l'acier, on utilise un recuit de détente, de relaxation ou de recristallisation qui impliquent que :

- R_e , R_m , H diminuent,
- $A\%$, K augmentent.

La température de chauffage dépend de l'état d'écrouissage et de la teneur en éléments alliés (450°C et 800°C).

Différents traitements de recuit

❑ Recuit de détente (ou de stabilisation, ou de relaxation)

- Il est appliquée aux pièces **moulées**, **usinées** et **soudées** dans lesquelles le processus de fabrication engendre des contraintes résiduelles. Donc cette forme de recuit est destinée à supprimer ou diminuer ces contraintes.
- La température de ce recuit est choisie entre 350 à 650°C et s'effectue pendant quelques heures et suivie d'un refroidissement lent.
- Les contraintes résiduelles sont également supprimées par d'autres formes de recuits (recuit de recristallisation ou revenu).

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Différents traitements de recuit

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

□ Le recuit complet

- Il est destiné pour les aciers hypoeutectoïdes, qui sont chauffés jusqu'à une température $A_{C3} + (30 \text{ à } 50^\circ\text{C})$ et maintenu à cette température jusqu'au chauffage complet et achèvement des transformations de phases. Le refroidissement s'effectue lentement dans le four jusqu'à la température de 500°C ensuite à l'air.
- le recuit complet permet un retour à l'état d'équilibre physico-chimique avec :
 - R_e , R_m , H minimums
 - $A\%$, K maximums

Traitements mécaniques

□ Traitements de grenaillage

- Introduire des contraintes résiduelles de compression au sein d'une couche mince de la pièce
 - Diminution de la contrainte de traction de surface lors du chargement
 - Retardement de l'apparition d'une fissure

- Durcissement superficiel
 - Augmenter la dureté de surface de la pièce pour éviter des défauts (rayures) causés par l'environnement extérieur.

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

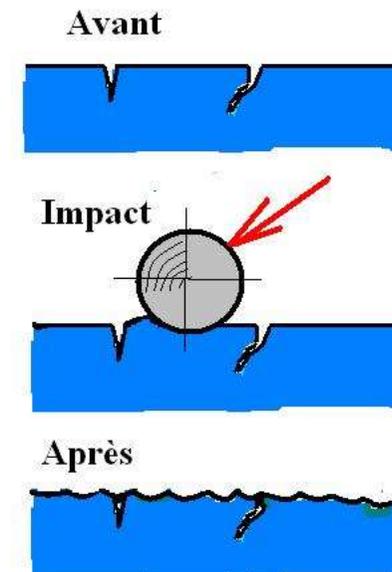
Traitements mécaniques

□ Protocole expérimental du grenailage

Des petites particules (billes: acier, verre ou céramique) dures sont projetées à grande vitesse ($\sim 100\text{m/s}$) sur la surface et la déforme

→ Déformation plastique (durcissement structural)

→ Contraintes résiduelles superficielles de compression



Traitements chimiques

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

❑ Cémentation par carbone

Traitement thermochimique de diffusion ayant pour but l'enrichissement en carbone d'une couche superficielle de la pièce à traiter. L'opération de diffusion est toujours suivie d'une trempe afin d'obtenir le durcissement de la couche enrichie par formation de martensite.

❑ Etape d'enrichissement en carbone

- Mise en contact avec un milieu cémentant (bains de sels, gazeux...)
- On crée une couche superficielle plus ou moins enrichie en carbone (0.1 à 0.2% au départ) avec des teneurs finales de 0.7 à 1.2% de carbone

Traitements chimiques

❑ Mécanisme de Cémentation

- Une réaction chimique qui fournit du carbone à la surface de la pièce
- Un processus de diffusion dans la zone superficielle, de la surface vers l'intérieur

Le carbone étant bien plus soluble en phase austénitique qu'en phase ferritique, de plus la diffusion étant facilitée par la température, le traitement a lieu vers 900°C à 950°C avec un temps de maintien de plusieurs heures.



Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

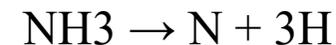
Traitements chimiques

❑ Traitement de nitruration

Durcissement superficiel par diffusion d'azote sans traitement thermique consécutif.

A 500°C

1. dissociation thermique de l'ammoniac



2. Formation de nitrure de dureté élevée, mais peu résilient:



Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

Ce qu'il faut retenir

Introduction

Définition

Le revenu

Traitements de revenu

Evolution des Propriétés

Le recuit

Traitements de recuit

Traitements mécaniques

Traitements chimiques

Ce qu'il faut retenir

- Objectifs et mode opératoire d'un revenu
- Microstructure obtenue par revenu
- Objectif et mode opératoire d'un recuit
- Différents types de traitements de recuit
- Différents types de traitements mécaniques et chimiques