REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'étude de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Ingénierie des matériaux et des surfaces

Durcissement structurale par traitement de trempe d'une pièce mécanique en acier (100Cr6)

Présenté par :

BENAISTI Abdelraouf

OUKRIF Chakib

Proposé et Dirigé par :

Mr. BENIMAM Samir

Promo 2021

Remerciement

Nous souhaitons remercier avant tout notre promoteur **M*r. BENIMAM Samir*** qui a permis la réalisation de ce mémoire dans les meilleures conditions, et qui a été pour nous le modèle d'accomplissement personnel et professionnel. Nous saluons sa compétence, sa patience et ses judicieux conseils. nous avons énormément appris de lui, dont l'intuition scientifique et le sens de la direction ont su orienter notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury de ce mémoire et précisément à Monsieur le président qui a accepté de gérer la soutenance de ce travail, nous les remercions vivement de toutes ces remarques et ces conseilles que nous avons vraiment pris en haute considérations..

Nous adressons nos profonds remerciements aussi à Monsieur *H**EBIRECHE*** et Monsieur **DJEGHDJOUGH** de nous avoir accueilli et prouvé l'aide précieuse dans notre recherche.

Nous exprimons aussi notre reconnaissance particulière aux ingénieurs du POVAL pour sa gentillesse et sa disponibilité.

Nous remercions vivement nos parents nos proches et nos amis qui nous ont soutenu pendant cette période. Sans leurs encouragements et leur présence affective, nous n'aurons pu mener à bien ce modeste travail.

الملخص

100Cr6
الفولاذ هو عضو في عائلة الفولاذ منخفض السبائك التي يمكن تشكيلها من الفولاذ عالي الكربون المصنوع من الكروم.

الهدف من عملنا هو تحديد الخصائص الميكانيكية لصلب ومعرفة تأثير المعالجة الحرارية (التسقية والتلطيف) على صلابة وبنية هذا الفولاذ

كلمات مفاتيح

.فولاذ ، تلطيف ، تلطيف ، هيكل ، صلابة

Résumé:

L'acier 100 Cr 6 fait partie de famille des aciers faiblement alliés qui peuvent être forgés, acier à outil, au chrome à haute teneur en carbone.

Le but de notre travail consiste à définir les caractéristiques mécaniques de l’acier 100 Cr 6 et savoir l’influence du traitement thermique (Trempe et Revenu) sur la dureté et la structure de ce acier.

Mot clés:

Acier 100Cr6, Trempe, Revenu, Structure, Dureté.

Abstract:

Steel 100 Cr 6 belongs to family of low alloy steels that can be forged, tool steel at high carbon chromium.

The goal of our work is to define the mechanical characteristics of 100 Cr 6 steel and to know the influence of heat treatment (Quenching and Tempering) on the hardness and structure of this steel.

Keywords:

100Cr6 steel, Tempering, Tempering, Structure, Hardness.

Tableaux de matière…… I

Liste des figures……VI

Liste des tableaux…… VIII

Introduction générale……1

Chapitre 1 : Les Alliages Ferreux

I. Les différentes phases du système Fer-Carbone **……..3**

I.1. La ferrite α**…… 3**

I.2. La ferrite δ**……3**

I.3. L'austénite γ**……3**

I.4. La cémentite (Carbone de fer Fe3C) **……3**

I.5. La perlite**……3**

II. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone **……..4**

III. Les points caractéristiques du diagramme**……..5**

IV.1 Définition d'un acier **……..8**

IV.2 Les différentes classes d'aciers**……..** 8

IV.2.1 Aciers non alliés et aciers alliés **……..8**

IV.2.2 Aciers de qualité **……..9**

A- Aciers de qualité non alliés**……..9**

A.1 Aciers au carbone pour appareils à pression**……..9**

A.2 Aciers pour emboutissage et pliage à froid**……..9**

B- Aciers de qualité alliés**……..9**

IV.2.3 Les aciers spéciaux **……..10**

A- Aciers spéciaux non alliés **……..10**

IV.2.4 Aciers inoxydables **……..11**

IV.2.5 Aciers à outils **……..11**

V. Définition métallurgique des fontes **……..11**

V.1. Classification des fontes **……..12**

1.1. Fontes grises à graphite lamellaire**……..12**

1.2. Fontes à graphite sphéroïdal **……..13**

1.3. Fontes à graphite vermiculaire **……..13**

1.4. Fontes blanches et fontes trempées **……..14**

1.4.1. Fontes blanches **……..14**

1.4.2. Fontes trempées **……..14**

1.5. Fontes malléables **……..14**

1.5.1. Fontes malléables à « cœur noir » **……15**

1.5.2. Fontes malléables « à cœur blanc » **……15**

1.6. Fontes spéciales alliées **……..15**

Chapitre 2 : Les Traitements Thermiques Des Aciers

I. Introduction**……..17**

II. Définitions et procédés des traitements thermiques **……..18**

III. La trempe**……..18**

1. Les différents types de trempe**……..19**

1.1. La trempe martensitique**……..19**

1.2. La trempe bainitique **……..19**

1.3. La trempe austénitique (ou hypertrempe) **……..20**

a. Trempe à l'eau **……..20**

b. Trempe à l'huile **……..21**

c. Trempe à l'air **……..21**

1.4. La trempe subzéro (ou cryogénique) **……..22**

IV. Les revenus**……..24**

V. Les recuits**……..26**

2. Types de recuit **……..27**

a)Recuit de normalisation **……..27**

b) Recuit complet **……..28**

c)Recuit de sphéroïdisation (ou de coalescence ou de globalisation) **……..29**

d) Recuit de recristallisation **……30**

e) Recuit de détente **……...31**

f) Recuit d'homogénéisation **……32**

VI. L'austénitisation **……33**

VII. La cémentation**……33**

1.1. La cémentation gazeuse**……35**

1.2. La cémentation « basse pression » **……35**

VIII. Nitruration **……36**

IX. La nitrocarburation ……..38

X. La carbonitruration……..39

Chapitre 3 : Résultats Et Discussion

I. Introduction ……41

II. Acier 100 Cr 6 ……41

III. Matériels utilisés ……42

1. La scie à métaux ……42

2. La machine de tour……..42

3. Le four pour le traitement thermique……..43

4. La polisseuse ……44

5. Microscope optique ……44

6.Le duromètre……45

7. Le duromètre Rockwell ……45

VI. Résultat expérimental ……46

1. Nos échantillons ……46

2. Le mécanisme de la trempe ……46

3. Le processus opératoire du revenu ……46

4. Le polissage ……47

5. Observation au microscope optique ……48

6. Mesure de la dureté……50

7. Interprétation des résultats ……51

Conclusion générale ……..……..……..52

Recherche bibliographique ……..……..……..53

Liste des figures

Fig. 1.1. Illustration schématique des principaux constituants du système Fe3-C

Figure 1.2. – Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe -Fe3C

Fig.2.1. Le cycle thermique.

Fig2.2: Courbe TTT (acier faiblement allie 0.42%C)

Fig.2.3. Le cycle thermique lors d'une trempe subzéro oucyogénique.

Fig.2.4. Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement [6].

Fig2.5: Diagramme de revenu de l'acie.

Fig 2.6: Cycle thermique de recuit de normalisation

Fig2.7: Cycle thermique de recuit spheroidisation

Fig2.8: cycle thermique de recuit de recristallisation

Fig2.9:cycle thermique de recuit de detente

Fig2.10:cycle thermique de recuit d'homogeneisation

Fig2.11: domaine de temperatures d'austinisation

Fig2.12:cycle thermique de recuit cementaion.

Figure 2.13:. – Le cycle thermique d'un traitement de nitruration

Fig.3.1. Un scie à métaux.

Fig.3.2. Une machine à tour.

Fig.3.3. Le four pour le traitement thermique.

Fig.3.4. La polisseuse.

Fig.3.5. Le microscope métallographique triloculaire.

Fig.3.6. Le duromètre.

Fig.3.7. Les échantillons utilisés.

Fig.3.8. Le polissage des échantillons.

Fig.3.9. L'acier 100Cr6 **trempé à 760°C à l'eau**.

Fig.3.10. L’acier 100Cr6 **trempé à 760°C à l’huile**.

Fig.3.11. L’acier 100Cr6 **trempé à 900°C à l’eau**.

Fig.3.12. L’acier 100Cr6 **trempé à 900°C à l’huile**.

Fig.3.13. Diagramme de phase de l’acier 100Cr6.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les points caractéristiques du diagramme Fer-carbone stable et métastable.

***Tableau* 3.1** : caractéristiques mécaniques de l'acier 100Cr6.

Tableau* 3.2*.: composition chimique de l'acier 100Cr6.

Tableau* 3.3*.: Les différents traitements thermique appliqués sur nos échantillons de l'acier 100Cr6.

Tableau* 3.2*.: La mesure de la dureté de l'acier 100Cr6.

Introduction générale

Introduction générale:

Alliages, mélanges de phases et diagrammes d'équilibre Les métaux utilisés industriellement sont rarement des corps purs. Ils sont au contraire composés de plusieurs éléments pour former des alliages. On appelle composant un corps pur chimiquement défini.

Ce peut être un corps simple (Fe, Cu, etc.) ou un corps composé de plusieurs éléments dans des proportions fixes (Fe3C, SiO2, etc.). Dans tous les cas, un composant a une température de fusion fixe. On appelle phase, une région ou un ensemble de régions d'un alliage, caractérisée par une composition et une structure identique.

Les différentes phases peuvent être de nature différente ; on trouve ainsi :

– Les solutions liquides.

– Les solutions solides, qui sont un mélange homogène de deux ou plusieurs composants ; nous avons vu que les atomes de soluté pouvaient se mettre soit en position interstitielle, soit en substitution dans le réseau solvant. Ces solutions solides ont donc la structure cristalline du solvant.

– Différents composés à liaisons ioniques ou covalentes appelés phases non métalliques (carbures, nitrures, sulfures, oxydes, etc.) ou à liaisons métalliques appelés alors phases de Laves ou composés intermétalliques.

Parmi ces alliage on trouve les aciers sont d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Ce progrès est essentiellement dû à la présence d'une vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers, en recourant à l'addition d'éléments d'alliages et aux différents mécaniques, thermiques et chimiques.

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non. Au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage: il est considéré alors comme un acier allié.

Les roulements sont des éléments souvent présents dans les systèmes mécaniques

Introduction générale

lorsqu'une fonction de rotation doit être assurée. Les alliages utilisés pour réaliser le roulement sont choisis en fonction de leurs caractéristiques de la dureté. La plupart présentent l'inconvénient d'être constitués de structures métastable, susceptibles d'engendrer des variations dimensionnelles en service. C'est notamment le cas des structures martensitiques de l'acier 100Cr6, le plus utilisé dans l'industrie du roulement. La prospection des conditions optimales de traitement thermique de façon à obtenir le meilleur compromis dureté-stabilité dimensionnelle et la détermination d'évolution en service. Cet acier typique utilisé dans les roulements à billes, rouleaux ou à aiguilles, cuvettes, butées, cames, galets, très utilisé en mécanique d'outillage : goupilles, poinçons, colonnes de guidage, limes, forets, alésoirs…..

L'univers des fonderies d'acier est directement concerné par le recours à divers procédés de traitements thermiques.

Le traitement thermique habituellement pratiqué sur le 100Cr6 pour confère à l'acier la dureté et la stabilité indispensables au roulement, est constitué d'une austénitisation entre 830°C et 850°C, d'une trempe à l'huile, puis d'un revenu de détente. Le choix de revenu permet d'obtenir un compromis dureté-stabilité dimensionnelle qui dépend de l'application visée. C'est donc pourquoi nous y consacrons ce travail à étudier les différents traitement thermique sur les propriétés mécanique de l'acier 100Cr6.

L'objectif principal de cette étude est la caractérisation mécanique de l'acier 100Cr6 à traves la mesure de la micro dureté et la microscopie d'une part et aussi de mettre en évidence les effets de traitement thermique sur la structure et les propriétés mécaniques du deux nuances d'acier à roulement d'autre part.

Ce mémoire est agencé en trois chapitres distincts et complémentaires :

- Le premier chapitre propose une analyse bibliographique sur les alliages ferreux.
- Le deuxième chapitre donne un aperçu sur les traitements thermiques.
- Le troisième chapitre montre la procédure expérimentale adoptée pour mener à bien les différentes étapes pratique, et la présentation des résultats obtenus à travers les observations microscopique et les prélèvements de la dureté.

Chapitre1 : Les Alliages Ferreux

I. Les différentes phases du système Fer-Carbone :

I.1. La ferrite α

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α, à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre (HB≈80), peu tenace (R≈300 MPa), mais très ductile (A≈35%).

I.2. La ferrite δ

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ. Sa structure est cubique centré CC. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

I.3. L'austénite γ

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ, à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint ≈2%C à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

I.4. La cémentite (Carbone de fer Fe3C)

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6,67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure
et très fragile.

I.5. La perlite

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C, La perlite est dure (HB≈200), résistante (Rm≈850 MPa) et assez ductile (A%≈10).

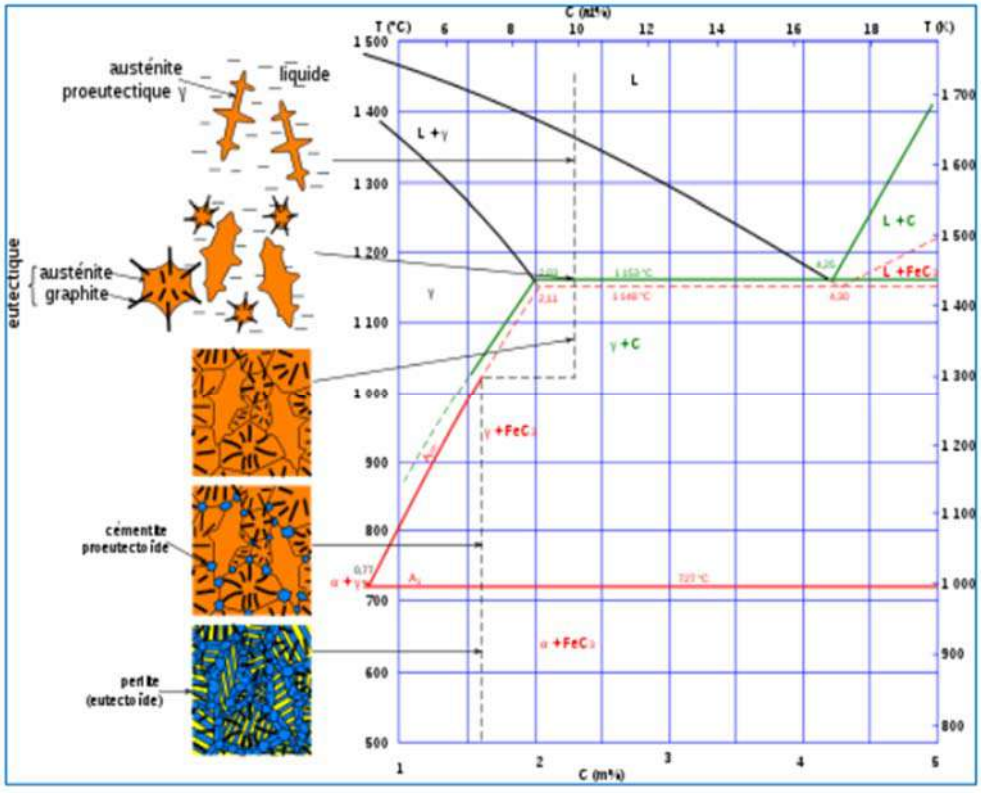


Fig. 1.1. Illustration schématique des principaux constituants du système Fe3-C

II. Diagramme d'équilibre Fer-Carbone:

Dans un alliage fer-carbone, les constituants se classent en deux catégories :

– ceux qui sont à base de fer : ferrite, austénite... ;

– ceux qui sont riches en carbone : cémentite Fe3C, graphite (variété cristallisée du carbone pur).

Le diagramme d'équilibre Fer-carbone est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements thermiques. Il est limité à droite par la cémentite Fe3C (6.67%C) est fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux : les aciers (entre 0.008%C et 2%C) et les fontes (de 2%C à 6.67%C).

Dans les aciers, sauf exception limite, le graphite n'apparaît jamais. Dans les fontes, au contraire, le graphite est présent le plus souvent en particules de formes diverses, réglables par certains traitements métallurgiques antérieurs à la solidification et qui conduisent d'ailleurs à une classification fondamentale.

L'origine de cette spécificité des fontes tient à leur composition chimique et au fait que le diagramme d'équilibre fer-carbone existe sous deux configurations qui ont des éléments communs mais qui, néanmoins, se distinguent nettement :

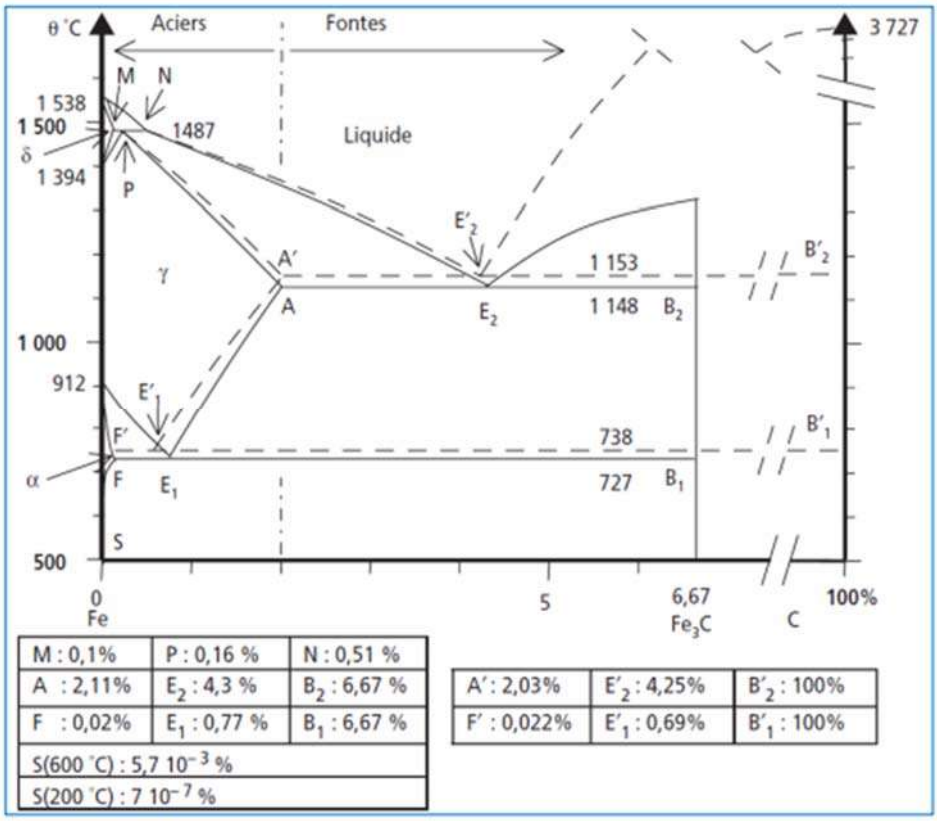
– le diagramme métastable concerne les aciers et les fontes où la phase riche en carbone est le carbure de fer Fe3C;

– le diagramme stable ne concerne que les fontes où la phase riche en carbone est le graphite.

L'étude dans les conditions d'équilibre des alliages Fe-C, montre qu'ils subissent deux types d'évolution :
La première produit une phase riche en carbone de formule Fe3C appelé carbone de fer ou cémentite. Le diagramme correspondant est dit ***métastable ou à cémentite***.
La deuxième forme une phase riche en carbone qui reste à l'état de graphite pur Cgr, qui a une miscibilité nulle avec le fer. Le diagramme correspondant est dit stable ou à graphite. Son obtention exige la décomposition du carbone Fe3C en refroidissant avec une vitesse très lente et en ajoutant un catalyseur à grande pouvoir de graphitisation tel que le silicium.

La figure 1.2. représente à la fois les deux diagrammes, celui représenté par des traits en pointillés correspond au diagramme stable fer-graphite et l'autre en trait continu au diagramme métastable fer-cémentite.

Chapitre1 : Les Alliages Ferreux



M : 0,1%	P : 0,16 %	N : 0,51 %
A : 2,11%	E_2 : 4,3 %	B_2 : 6,67 %
F : 0,02%	E_1 : 0,77 %	B_1 : 6,67 %
S(600 °C) : 5,7 10^{-3} %		
S(200 °C) : 7 10^{-7} %		

A' : 2,03%	E'_2 : 4,25%	B'_2 : 100%
F' : 0,022%	E'_1 : 0,69%	B'_1 : 100%

Figure 1.2. – Diagrammes Fe-C pour les aciers et les fontes. En pointillés : diagramme stable Fe-C. En traits pleins : diagramme métastable Fe -Fe3C

III. Les points caractéristiques du diagramme:

A : correspond à la température de fusion du fer pur (1539°C).

D : correspond à la température de fusion de la cémentite (1392°C).

B : 0,51% C dans la phase liquide en équilibre avec la ferrite δ et l'austénite à la température péritectique 1493°C.

H : 0,10% C teneur limite du carbone dans la ferrite δ à 1493°C.

I : 0,16% C dans l'austénite à la température péritectique 1499°C. N (1392°C) et G (910°C) : marquent la transformation plymorphe ferrite austénite (δ γ)

E : 2,l% C teneur limite du carbone dans l'austénite à la température eutectique (ECF 1147°C).

S : 0,8% C dans l'austénite à la température eutectoide 727°C.

P : 0,02%o C teneur limite dans la ferrite à la température eutectoide 727°C

C : 4,3%o C transformation eutectique à la température 1147°C.

Chapitre1 : Les Alliages Ferreux

Les liquides du diagramme d'équilibre Fe-Fe3C qui déterminent le processus de cristallisation ont la notation et le sens physique suivant :

AB : Liquidus qui matérialise la température de début de cristallisation de la ferrite δ à partir de l'alliage liquide.

NH et **NI**: Limite supérieure et inférieure de la coexistence des deux phases ferrite δ et austénite γ

BC : Liquidus qui marque le début de cristallisation de l'austénite A à partir de l'alliage liquide.

CD : Liquidus correspondant au début de cristallisation de la cémentite primaire (Cml) à partir de l'alliage liquide.

Donc **ABCD** représente la ligne liquidus pour tout le diagramme, au dessus de **ABCD** tous les alliages sont à l'état liquide.

AH : Ligne de solidus traduisant les températures délimitants le domaine de l'alliage liquide et les cristaux Fe δ. Au dessous de AH existent uniquement les cristaux de ferrite δ.

HIB : Ligne de transformation péritectique (T = 1499°C = este). A la température inférieure à 1499°C, on a l'amorce de la réaction péritectique (interaction du liquide de composition B avec les cristaux de ferrite S de composition H dégage de l'austénite de composition I.

LB + FH ---------- > **Ai**

ECF : Cette ligne correspond à la cristallisation de l'eutectique appelé Lédéburite (Lb).

Donc **AHIECF** représente la ligne de solidus, au dessous de cette ligne tous les alliages se trouvent à l'état cristallin (solide).

Entre les lignes de solidus et de liquidus tous les alliages se trouvent à l'état pâteux avec des composantes hétérogènes du liquide et de cristaux (ferrite, austénite, cémentite) ayant des compositions différentes et dans des portions variables.

Les alliages à teneur en carbone inférieure ou égale à 2,06% C s'appellent ACIERS et dont la teneur en carbone est inférieure à 2,06% C s'appellent FONTES. Cette délimitation coïncide avec la solubilité limite du carbone dans l'austénite. L'austénite possède une structure très plastique ce qui rend les aciers malléables, les fontes possèdent de bonnes propriétés de fonderie, un point de fusion plus bas et des retraits plus petits dus à la présence dans la structure du composant eutectique lédéburite.

Les points de transformations des aciers jouent un rôle prédominant dans la détermination des températures des traitements thermiques (trempe, revenu, recuit et cémentation). Ces

points sont notés par A0, A1, A2, A3 et Acm lors du chauffage ou du refroidissement sont notés respectivement par Aco, AC1, AC2, AC3, ACcm et Ar0, Arl, Ar2, Ar3, Arcm.

A0: (T = 210°C) correspond à la transformation lors du chauffage de la cémentite ferromagnétique en cémentite non magnétique.

A1 : (T = 727°C) correspond à la transformation réversible perlite↔ austénite.

A2 : point de curie (T = 769°C), au dessus de cette température le fer perd ses propriétés magnétiques, cette température est marquée par ligne MO.

A3 : correspond aux températures associées à la ligne SE (Cm : symbole abrégé de la cémentite).

Donc les lignes GOS et SE représentent le lieu des points A3 et ACm définissant des températures variables.

A partir de ce diagramme fer -Carbone on peur définir les aciers et les fontes suivant la teneur en carbone :

Point	Température en °C	% de carbone
A	1539	0
B	1499	0,51
C	1147	4,30
D	1392	6,67
E	1147	2,06
F	1147	6,67
G	910	0
H	1499	0,10
I	1499	0,16
K	723	6,67
M	760	0
N	1392	0
P	727	0,02
Q	20	0,006
C'	1147	4,30
E'	1153	2,03
S'	727	0,69

Désignation	% de carbone
Aciers hypoeutectiques	0,02 à 0,8
Aciers entectoïdes	0,8
Aciers hypereutectiques	0,8 à 2,06
Aciers hypoeutectiques	2,06 à 4,3
Fontes eutectiques	4,3
Fontes hypereutectiques	4,3 à 6,67

Tableau 1.1 : Les points caractéristiques du diagramme Fer-carbone stable et métastable.

Les transformations

Le diagramme Fer-carbone contient trois réactions isothermes caractérisées par des paliers :

- ***Eutectique à 1147°C** : il marque la température minimale d'existence du liquide.*
- ***Eutectoïde à 723°C (A1**). Il marque la fin de la transformation au chauffage de la perlite en austénite. Au-dessus de 723°C, la perlite n'existe plus*
- ***Péritectique à 1487°C**, mais d'importance négligeable de point de vue industrielle.*

Chapitre1 : Les Alliages Ferreux

IV.1 Définition d'un acier :

Selon le dictionnaire ROBERT, un acier est un « alliage de fer et de carbone (moins de 1,5 %) auquel on donne, par traitement mécanique ou thermique, des propriétés variées (malléabilité, résistance...) ».

Selon la norme NF EN 10020 (qui en juin 1989 a remplacé la norme NF A 02-025), « acier un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte ».

À la lecture de ces deux définitions, on constate que la limite supérieure de la teneur en carbone des alliages Fe-C susceptibles de s'appeler des aciers (par différence avec les fontes) est délicate à préciser. C'est la raison pour laquelle il peut être préférable d'adopter un point de vue plus métallurgique en prenant en compte la différence intervenant lors de la solidification de ces alliages.

La solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique qui inclut la précipitation de carbure de fer et/ou de graphite.

IV.2 Les différentes classes d'aciers :

Les familles d'aciers sont classées en deux critères :

A- La composition chimique : nature et teneur des éléments d'alliage, aciers non alliés (≤1% d'éléments d'alliage), aciers peut alliés (teneur de chaque éléments d'alliage ≤5%), aciers très alliés.

B- Propriétés d'usage ou qualité : aciers de qualité, aciers spéciaux, (aciers d'usage général, aciers de construction mécanique, aciers pour appareils à pression, aciers à outils, aciers inoxydables).

IV.2.1 Aciers non alliés et aciers alliés

Pour définir ces 2 classes d'aciers, il faut prend en compte :

• pour un élément d'alliage autre que Mn, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou 70 % de la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée;

• pour le manganèse, la teneur minimale imposée pour l'analyse de coulée ou la teneur maximale imposée si seule cette dernière est fixée (la limite prévue au tableau suivant est alors portée à 1,80 %).

Chapitre1 : Les Alliages Ferreux

Les limites des teneurs en éléments d'alliage qui séparent le domaine des aciers non alliés du domaine des aciers alliés sont indiquées dans le Tableau : II.2. Un acier est considéré comme allié dès qu'une de ces limites est atteinte.

Élément spécifié Limite % Al 0,30 B 0,008 Cr 0,30 Cu 0,40 Mn 1,65(2) Mo(1) 0,08 Nb(2) 0,08 Ni(1) 0,30 Si 0,60 Ti(2) 0,05 V(2) 0,10 W 0,30 Zr 0,05 Autres éléments(C S P N…) 0,05 Tableau I 2 Les limites des teneurs en éléments d'alliage 4

(1) et (2) lorsque ces éléments sont spécifiés par 2 ou 3 ou 4 la valeur limite de la somme est égale à 70 % de la somme des valeurs individuelles. (3) Si Mn est défini par un maximum la limite est 1,80

IV.2.2 Aciers de qualité

Les aciers de qualité: sont des aciers pour lesquels il existe, par exemple, des exigences de propriétés spécifiées de ténacité, de grosseur de grain et/ou de formabilité.

A- Aciers de qualité non alliés:

Tous les aciers non alliés qui ne sont pas des aciers spéciaux.

A.1 Aciers au carbone pour appareils à pression:

Aciers de qualité non alliés (Fe/C ou Fe/C/Mn) auxquels il est demandé de retrouver leur structure d'emploi par normalisation (et éventuellement revenu) après mise en forme à chaud (à l'état austénitique). Ces aciers doivent satisfaire à des exigences particulières relatives à leur résistance à la rupture fragile et, lorsqu'ils sont employés à température supérieure à l'ambiante, à leur limite d'élasticité à chaud et à leur tenue au fluage.

A.2 Aciers pour emboutissage et pliage à froid:

Aciers de qualité livrés en produits plats auxquels il est demandé de présenter des propriétés particulières de ductilité, d'emboutissage et d'état de surface. En général, les teneurs en éléments interstitiels de ces aciers sont réduites le plus possible (sauf parfois en phosphore ajouté pour augmenter la limite d'élasticité). Parmi ces aciers, on peut classer les aciers pour emballages, aciers de qualité auxquels, outre l'aptitude à l'emboutissage, on demande une propreté inclusionnaire particulière et, dans certain cas, une protection spécifique contre la corrosion (fer blanc et fer chromé notamment).

B- Aciers de qualité alliés:

Aciers qui contiennent des éléments d'alliage mais ne sont pas, en général, destinés à un traitement thermique. Font partie de cette catégorie :

– des aciers à grains fins soudables de construction métallique;

– des aciers pour tôles magnétiques;

– des aciers pour rails, palplanches ou cadres de mine; 5

– des aciers en produits plats destinés à un formage à froid sévère et contenant des éléments d'affinement du grain tels que B, Nb, Ti, V et/ou Zr;

– des aciers ne contenant comme élément d'alliage que Cu;

– des aciers dits « dual phase » (aciers biphasés ferritiques avec 10 à 35 % de martensite) [1].

IV.2.3 Les aciers spéciaux :

Les aciers spéciaux présentent, par rapport aux aciers de qualité une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. Ils sont généralement destinés à un traitement thermique et se caractérisent par une réponse régulière à ce traitement.

A- Aciers spéciaux non alliés :

Font partie de cette catégorie :

– des aciers avec garantie de résilience à l'état trempé et revenu;

– les aciers avec garantie de réponse aux traitements thermiques;

– des aciers à teneur faible en inclusions;

– des aciers à teneur en S et P ne dépassant pas 0,020 % à l'analyse sur coulée et 0,025 % à l'analyse sur produit;

– des aciers dont la résilience KV en long à

– 50 °C est supérieure à 27 J sur éprouvettes prélevées en long et 16 J sur éprouvettes prélevées en travers;

– des aciers pour réacteurs nucléaires avec Cu ≤ 0,10 %, Co ≤ 0,05 % et V ≤ 0,05 %;

– des aciers ferrito-perlitiques micro-alliés au V et/ou Nb dont la teneur en carbone n'est pas supérieure à 0,25 %;

– des aciers pour armature de précontrainte du béton.

B- Aciers spéciaux alliés : Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers de qualité ni des aciers inoxydables. Font partie de cette catégorie :

– les aciers de construction mécanique;

– certains aciers soudables à grains fins pour appareils à pression;

– certains aciers résistant au fluage;

– les aciers pour roulement;

– les aciers à outils et les aciers à coupe rapide;

– des aciers à propriétés physiques spéciales.

IV.2.4 Aciers inoxydables :

On appelle aciers inoxydables des aciers qui résistent à la corrosion atmosphérique et à la corrosion électrochimique Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone (pour éviter la précipitation de carbures de chrome). Bien qu'un certain nombre tels que Mo, Cu, Si, Ti ,Nb , etc., soient ajoutés pour améliorer la tenue a la corrosion ou les propriétés mécaniques, l'essentiel des propriétés des aciers inoxydables est lié a la connaissance des diagrammes de phases et des diagrammes TRC des alliage ternaires FeC-Cr et quaternaires Fe-C-Cr-Ni.

IV.2.5 Aciers à outils :

Ces aciers sont utilisés dans la fabrication d'outils destinés ; soit a la mise en forme d'autre matériaux avec ou sans enlèvement de matière ; soit à la préhension ou au mesurage d'objets. La diversité des problèmes posés dans ces domaines conduit a l'existence d'un très grand nombre de nuances d'aciers à outils. Il est intéressant de classer ces aciers selon la température atteinte par la partie active en cours de service, c'est-a-dire d'utilisé comme critère la résistance a l'adoucissement en fonction de la température (ou la dureté a chaud).la norme NF EN ISO 4957 range les aciers en quatre classes ;

A- Aciers non alliés pour travail à froid

B- Aciers alliés pour travail à froid

C- Aciers alliés pour travail à chaud

D- Les aciers rapides : Les éléments d'alliage de base sont W, Mo, V, Cr

V. Définition métallurgique des fontes :

Une fonte, qu'elle soit produite dans une usine sidérurgique pour être transformée en acier ou qu'elle soit élaborée dans une fonderie, afin de couler des pièces dans des moules, peut se définir comme un alliage à base de fer et de carbone, dont la teneur en carbone est suffisante pour que la fusion et la solidification se produisent dans un intervalle de température nettement plus bas que le point de fusion du fer et relativement étroit, soit généralement entre 1 100 et 1 350 °C. On a vu qu'au-delà d'environ 2 % de carbone, la

solidification impliquait la formation directe (vers 1 150 °C) d'un agrégat cristallin dit « eutectique » qui a une importance capitale pour toutes les fontes dont il constitue une partie essentielle de la structure.

Une solidification eutectique, se produisant par exemple à 1 150 °C pour une teneur de 4,3 % de carbone dans un alliage fer-carbone, permet de couler la fonte avec les plus grandes facilités et d'obtenir des pièces sans défauts. Ceci explique l'importance industrielle des fontes de composition quasi eutectique, même si leur résistance mécanique nominale n'est pas des plus élevées.

V.1. Classification des fontes :

Selon les considérations métallurgiques évoquées ci-avant, on classe les fontes ou les produits moulés en fonte en six grandes familles.

1.1. Fontes grises à graphite lamellaire

Ces alliages sont peut-être plus connus sous le nom de fontes « ordinaires » car ce sont les plus anciennement utilisées en construction mécanique, en architecture métallique, chauffage domestique et industriel, équipement de voirie. Aujourd'hui encore, elles ont une place prépondérante en fonderie.

Leur structure comprend essentiellement du graphite en lamelles – en paillettes –, ramifiées et arrangées en ensembles cellulaires, incluses dans une matrice le plus souvent perlitique ou perlito-ferritique. Elles peuvent contenir assez de phosphore pour former un réseau de cristaux analogues à des carbures mais moins durs.

Leurs caractéristiques sont les suivantes :

– leur résistance à la traction ne dépasse guère 400 MPa mais elles ont un meilleur comportement en compression, donc en flexion ;

– leur dureté est modérée (200-280 HB) ;

– elles sont très facilement usinables et résistent particulièrement bien à l'usure sans grippage ;

– elles amortissent bien les vibrations ;

– elles résistent bien aux corrosions courantes et à la chaleur ;

– elles reçoivent couramment des revêtements protecteurs : émaillage, bleuissage...

En revanche, elles cassent sans déformation plastique apparente, ce qui les fait considérer comme fragiles, résistant mal – sauf sous forme suffisamment massive –à des chocs directs importants.

1.2. Fontes à graphite sphéroïdal

Nées postérieurement à la Seconde Guerre mondiale, les fontes à graphite sphéroïdal – fontes GS –, dites aussi parfois fontes ductiles, sont obtenues par un traitement spécifique du métal liquide qui provoque au moment de la solidification un graphite non pas en lamelles mais sous forme de particules quasi sphériques (10 à 100 µm de diamètre). À part cette différence – capitale – la matrice métallique est comparable à celle d'une fonte grise ordinaire.

La sphéricité du graphite, lui-même de résistance mécanique négligeable, régularise la répartition des contraintes dans la matrice et permet de mieux approcher les propriétés de l'acier correspondant. Ainsi, tout en conservant des propriétés de fonderie favorables, les fontes GS ont des résistances à la traction pouvant dépasser 900 MPa – du moins pour leurs variétés spéciales – avec des modules d'élasticité relativement élevés et des capacités de déformation plastique non négligeables, voire importantes.

Certaines nuances ont une ténacité aux chocs suffisante pour permettre de les substituer en toute sécurité à de l'acier dans certaines applications remarquables comme les pièces de suspension et de freinage pour automobiles.

Sans doute, les fontes GS n'ont pas tous les avantages des aciers ou des fontes grises et, en particulier, leur élaboration – quoique parfaitement maîtrisée – est relativement délicate et exige des contrôles spécifiques stricts. Elles ont été substituées systématiquement aux fontes grises, aux fontes malléables et aux aciers dans des applications très importantes, notamment en construction automobile, dans les canalisations et accessoires d'hydraulique et de voirie.

1.3. Fontes à graphite vermiculaire

C'est une variété de fontes qui se développe lentement dans un champ d'application limité où l'on a besoin de propriétés combinant avantageusement celles des fontes grises et des fontes GS. La microstructure dite « vermiculaire » ou « compacte » du graphite – GCV – particules non sphériques, de forme allongée, mais beaucoup moins ramifiées que les lamelles des fontes grises, est obtenue par un traitement sur métal liquide dérivé de celui des fontes GS.

On connaît des applications intéressantes – éléments de gros moteurs thermiques, par exemple – en raison d'une conductivité thermique plus grande que celle des fontes GS homologues et d'une résistance aux contraintes thermomécaniques supérieure à celle des fontes grises.

Leur élaboration est au moins aussi délicate que celle des fontes GS ; elles peuvent être perlitiques, ferritiques, bainitiques... comme les autres fontes.

1.4. Fontes blanches et fontes trempées :

1.4.1. Fontes blanches

Les fontes blanches sont caractérisées par l'absence complète du graphite car le carbone, en excès – par rapport à sa solubilité maximale dans l'austénite – est combiné au fer sous forme de carbures métastables.

Les carbures à base de fer ont des propriétés physiques très différentes de celles du graphite et, en particulier, leur dureté élevée augmente beaucoup celle de la fonte dont ils constituent une fraction volumique importante.

Ainsi les fontes blanches, dures mais malheureusement plus ou moins fragiles, conviennent excellemment pour résister à l'usure abrasive ; en conséquence, il est très difficile, sinon impossible, de les usiner à l'aide d'outils coupants

Pour la plupart des applications modernes – éléments de broyeurs, par exemple –, les fontes blanches sont encore durcies par l'ajout d'éléments d'alliage (nickel, chrome, molybdène, vanadium, tungstène) avec une certaine amélioration de la ténacité aux chocs.

1.4.2. Fontes trempées

On appelle « fontes trempées » des fontes coulées au contact d'éléments refroidissants constituant le moule en tout ou partie ; ainsi les couches corticales solidifiées dans ces conditions sont en fonte blanche – effet de « trempe primaire » avec solidification dans le système métastable1 – tandis que le cœur et d'autres parties de la même pièce se solidifient en fonte grise ou GS.

On a ainsi une pièce « composite » ou un « bimétal ». Exemple : poussoirs de soupape, certains cylindres de laminoirs... Les pièces de ce genre sont fabriquées dans des fonderies spécialisées.

1.5. Fontes malléables

Par un recuit approprié, on peut industriellement décomposer les carbures primaires d'une fonte blanche suivant la réaction

$$Fe3C \rightarrow 3Fe + C \text{ (graphite)}.$$

Il est remarquable que le graphite précipite alors dans la matrice, à l'état solide, sous forme de particules non sphériques qu'on peut néanmoins qualifier de « nodules ».

Comme dans le cas des fontes GS, les propriétés s'approchent alors de celles de l'acier constituant la matrice, c'est-à-dire que la rupture est précédée par une déformation

plastique importante. On parle ici de « malléabilité », ce qui est impropre mais consacré par l'usage

1.5.1. Fontes malléables à « cœur noir »

Connues depuis une centaine d'années, ces fontes malléables « à cœur noir » – à cause du graphite –, dites parfois « américaines », ont joué un grand rôle dans le développement du machinisme agricole, de l'automobile... Mais actuellement, leur production est pratiquement abandonnée en France, d'autres pays leur réservant encore une part de marché plus importante.

1.5.2. Fontes malléables « à cœur blanc »

Un autre procédé classique pour produire des pièces déformables plastiquement à partir d'une fonte blanche consiste à la recuire en atmosphère décarburante – procédé Réaumur – pour éliminer la plus grande partie du carbone.

Bien adapté aux petites pièces de quincaillerie, aux raccords tubulaires, aux éléments d'ornementation, ce procédé a été abandonné en France à cause de graves handicaps : la très longue durée du traitement thermique et la limitation de l'épaisseur des pièces – moins de 10 mm.

On remarquera toutefois que, parmi toutes les variétés de fontes, celles-ci que l'on nomme « malléables à cœur blanc » – ou encore malléables européennes – sont les seules qui soient soudables sans plus de précautions que l'acier ordinaire.

1.6. Fontes spéciales alliées

La métallurgie des fontes permet d'améliorer leurs propriétés en vue d'applications définies et selon les mêmes principes que la métallurgie des aciers : apport d'éléments d'alliage, traitements thermiques. Ainsi, malgré les spécificités des fontes, on retrouve le même type de classification :

– les fontes peu alliées ou modérément alliées (teneur de quelques dixièmes ou quelques pour-cent) en nickel, chrome, cuivre, étain, molybdène, titane..., ne modifiant pas la structure mais rendant seulement la matrice plus fine, plus homogène, plus sensible aux traitements thermiques. Tel est le cas des fontes à graphite lamellaire, sphéroïdal ou vermiculaire et même les fontes blanches ; les possibilités sont au contraire fort restreintes dans le cas des fontes malléables (les éléments carburigènes étant évidemment exclus) ;

– les fontes grises, GS ou blanches fortement alliées (jusqu'à 40 % de métaux divers) dont la structure et les propriétés sont profondément influencées par la composition : fontes austénitiques au nickel (cuivre) chrome, fontes ferritiques à haute teneur en silicium ou en aluminium...

Chapitre1 : Les Alliages Ferreux

La coulée de pièces en fontes fortement alliées peut présenter des difficultés d'ordre métallurgique ou dues à des propriétés de fonderie défavorables ; c'est en principe la spécialité d'un petit nombre de fonderies qui n'en produisent le plus souvent que quelques nuances.

Pour certaines pièces, fortement sollicitées par la corrosion, la chaleur, l'abrasion..., les fontes spéciales sont seules envisageables malgré leur coût beaucoup plus élevé que celui des fontes courantes.

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

I. Introduction:

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations Combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but : D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

• Augmentation de la résistance à la rupture et de la limitée élastique, Re, A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.

• Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subit le forgeage.

De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage). En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour les quels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. En général les traitements thermiques ne Changent pas la composition chimique de l'alliage.[1]

Le cycle thermique :

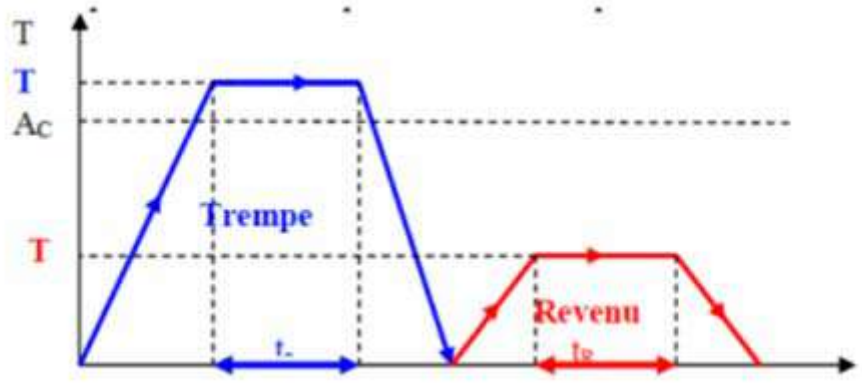


Fig.2.1. Le cycle thermique.

Les effets des traitements thermiques, pour une pièce, dépendent :

-de la température maximale

-de la durée de maintien de la pièce à cette température

-du milieu dans lequel se trouve la pièce à cette température

-de la vitesse de variation de la température lors du chauffage et surtout lors du refroidissement des dimensions de la pièce à traiter (effet de masse).

-des dimensions de la pièce à traiter (effet de masse).

II. Définitions et procédés des traitements thermiques :

III. La trempe:

En gros, la trempe est un traitement thermique de durcissement qui consiste à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer α ◊ fer γ (austénitisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale. Ce mode de durcissement, commun à de nombreux métaux, est réalisé selon le schéma général, à travers trois opérations successives : austénitisation, trempe et revenu.

La possibilité, de faire subir à un acier un durcissement par trempe, est soumise à deux conditions indispensables :

• une condition métallurgique : existence d'un domaine austénitique sur le diagramme d'équilibre de l'acier choisi de manière à pouvoir austénitiser cet acier en le portant à une température convenable;

• une condition thermique : possibilité de refroidir cet acier à une vitesse suffisante à partir de l'état austénitique de manière à provoquer la formation des constituants, hors d'équilibre, recherchés.

Le cycle thermique de la trempe sera caractéristique de la dureté finale recherchée. Ce degré de dureté envisagé fera recourir à différentes méthodes de refroidissement. La vitesse de refroidissement dépend principalement, pour une pièce déterminée :

- de la chaleur spécifique et la conductibilité thermique de l'acier;

- de la masse, la forme et l'état de surface de la pièce; plus la pièce sera massive plus le temps sera long;

- du pouvoir refroidissant du médium de trempe (air, eau, eau-sel, huile, sel, air forcé, etc.).

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

1. Les différents types de trempe:

On distingue différents types de trempe, soit la trempe martensitique, la trempe bainitique, la trempe austénitique (aussi appelée hypertrempe).

1.1. La trempe martensitique:

La trempe martensitique consiste à amener rapidement le métal à une température inférieure à la valeur critique Ms, généralement inférieure ou égale à 20 °C. Le refroidissement rapide de l'austénite provoque un blocage des atomes de carbone insérés dans le réseau gamma. Ce réseau devient quadratique centré instantanément. Cette nouvelle structure (solution solide d'insertion) se nomme martensite. Afin de pouvoir obtenir une structure martensitique, il faut que la vitesse de refroidissement soit supérieure à la vitesse critique de trempe martensitique. Il est évident que cette condition n'est pas réalisée en tous les points d'une pièce. En effet, la loi de refroidissement en un point d'une pièce dépend de la conductivité thermique du métal, de la forme et des dimensions de la pièce, ainsi que du pouvoir de refroidissement du fluide de trempe qui, lui, dépend de l'agitation du fluide.

Le milieu de trempe doit assurer le refroidissement dans toute la section des pièces, et l'obtention d'une structure martensitique sans produire de défauts tels que tapures , déformations, contraintes résiduelles, etc. Le meilleur refroidissement est celui qui se fait à grande vitesse dans l'intervalle de température A–Ms. Ceci permet d'étouffer la décomposition de l'austénite surfusionnée dans le domaine des transformations : perlitique et intermédiaire. Ce refroidissement est ralenti vers les basses températures dans le domaine de la transformation martensitique Ms–Mf. Une grande vitesse de refroidissement dans l'intervalle martensitique est indésirable car elle accroît les contraintes résiduelles et produit des tapures. L'uniformisation de la température en cours de refroidissement permet de limiter les tensions thermiques et se traduit par une suppression des déformations des pièces et une augmentation de la résilience et du % d'allongement de l'acier.[2]

1.2. La trempe bainitique:

Pour obtenir la bainite par trempe, l'acier austénitisé est refroidi à une température choisie, à vitesse suffisante pour éviter la transformation en ferrite ou perlite. On maintient à cette température (240 °C à 450 °C) pour obtenir une transformation totale et l'on refroidit ensuite à la température ambiante. La température choisie pour la trempe bainitique dépend de la microstructure désirée (et la dureté recherchée) et de la vitesse de transformation de l'acier.

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

Les propriétés de la bainite confèrent certaines qualités aux aciers, malgré les inconvénients signalés, en particulier, une meilleure ductilité (pour les fortes teneurs en carbone) que pour la trempe martensitique, et de meilleures propriétés de fluage, (aux températures de 400 °C à 500 °C) que la martensite revenue. Dans les deux cas, les structures obtenues (martensite ou bainite) présentent une dureté élevée.[3]

1.3. La trempe austénitique (ou hypertrempe)

Les aciers austénitiques11 dont la structure ne change pas, aussi bien par chauffage que par refroidissement, ne « prennent » pas la trempe. Le procédé d'hypertrempe permet d'adoucir ces aciers et consiste à chauffer les pièces vers 1 100 °C. Le refroidissement doit être rapide pour éviter la précipitation des carbures vers 600 °C à 800 °C. Il est généralement effectué à l'eau. L'huile est utilisée comme fluide de trempe pour les aciers à forte teneur en nickel.

Cette technique est appliquée plus particulièrement au traitement des aciers inoxydables et des aciers ferromanganèse, pour permettre d'effectuer un usinage ultérieur ou maintenir, voire remettre en solution dans l'austénite, les carbures dont la précipitation dans les espaces inter-grains favoriserait la corrosion cristalline.[4]

a. Trempe à l'eau :

L'eau constitue le milieu de refroidissement le moins cher qui permette, dans la pratique de tous les jours, de réaliser les refroidissements les plus énergiques. Toute fois, il faut noter qu'au cours d'une trempe à l'eau la vitesse de refroidissement n'est pas constante. L'eau a l'avantage de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique. Lorsque la géométrie de la pièce le permet, l'eau peut former facilement des bulles de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux ; la circulation de l'eau, l'agitation de la pièce ainsi que sa présentation doivent donc être adaptées. Si la température de l'eau s'élève, son pouvoir refroidissant diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée).

Ainsi donc, l'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :

- de la température de l'eau

- de l'agitation des pièces

- de la circulation de l'eau et de son renouvellement éventuel. Par ailleurs, il est nécessaire d'éviter toute contamination de l'eau par des produits étrangers (sels notamment), qui changerait sa sévérité de trempe et empêcherait d'obtenir des résultats constants. [5]

b. Trempe à l'huile :

Il existe une très grande variété d'huiles de trempe qui peuvent différer :

- par l'huile de base (minérale ou synthétique)

- par les additifs qu'elles contiennent, additifs qui ont pour objet soit de modifier le pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (notamment la résistance à l'oxydation).

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante; elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise, suivant les propriétés de l'huile considérée, entre 400 et 600 °C, soit à un niveau bien supérieur à celui correspondant à la trempe à l'eau. La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente .[5]

c. Trempe à l'air :

Est le cas le plus simple à mettre en ouvre et il doit être choisi en priorité dans le cas des aciers à outils de bonne trempabilité, car les risques de déformations sont d'autant plus grandes que le monde de refroidissement est plus rapide .

Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier.

Pour les aciers au carbone , la trempe se fait dans l'eau de 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérant à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente. Le refroidissement rapide par trempe ne permet ni la germination ni la croissance des nouvelles phases. La diffusion à longue distance, nécessaire à la ségrégation du C et des éléments d'alliage, aurait besoin de plus de temps pour produire un effet notable. [5]

L'austénite n'étant pas stable à basse température et la ferrite n'étant pas capable de dissoudre suffisamment de carbone, la transformation martensitique se produit.

Elle est beaucoup plus rapide, car elle s'opère sans aucune diffusion. Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, appelés plans d'accolement, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation.

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

Un plan d'accolement est un plan cristallographique dans lequel la disposition des atomes est aussi identique que possible dans l'ancienne et la nouvelle structure (minimum de distorsion).

Lors de la transformation les atomes ne se déplacent que d'une distance nettement inférieure au paramètre de la maille. L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation α − γ. Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en conditions isothermes, Température - Temps - taux de Transformation, Figure 2.2).[5]

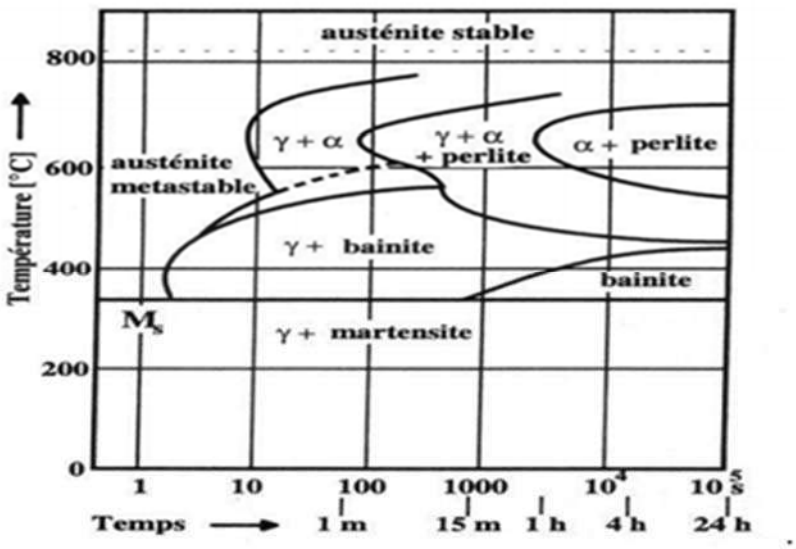


Fig2.2: Courbe TTT (acier faiblement allie 0.42%C)

1.4. La trempe subzéro (ou cryogénique):

Ce procédé consiste à refroidir dans la neige carbonique, ou l'air liquide, les pièces traitées en trempe étagée martensitique dont la transformation austénite-martensite est insuffisante pour obtenir la dureté recherchée. Cette trempe est très intéressante avec les aciers cémentés pour lesquels la température de trempe n'est qu'un compromis entre la température assurant la trempe à cœur et celle assurant la trempe des couches extérieures. Le traitement par le froid (ou traitement cryogénique) consiste à refroidir les pièces mécaniques en dessus de la température ambiante après un traitement thermique de trempe. La température de maintien se situe entre 0 °C et 150 °C (le plus souvent entre 80 °C et 100 °C pour les aciers).

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

On justifie le choix de ce type de traitement par le froid sur les aciers par la nécessité d'atteindre une température inférieure à la température ambiante et qui suppose que des transformations métallurgiques peuvent intervenir pour des températures atteintes inférieures à celle-ci. C'est le cas notamment de certains alliages fer-carbone pour lesquels le point Mf de fin de transformation de l'austénite en martensite est lui-même inférieur à 0 °C, d'où la subsistance après trempe d'austénite résiduelle (ou austénite retenue).

Le traitement par le froid aura donc pour effet sur les aciers contenant de l'austénite résiduelle :

- d'augmenter la dureté et la limite élastique avec corrélativement une baisse de résilience et une augmentation des contraintes internes,

- d'augmenter la stabilité dimensionnelle des pièces. Il est ainsi particulièrement recommandé pour les calibres, les éléments à jeux très serrés.[6]

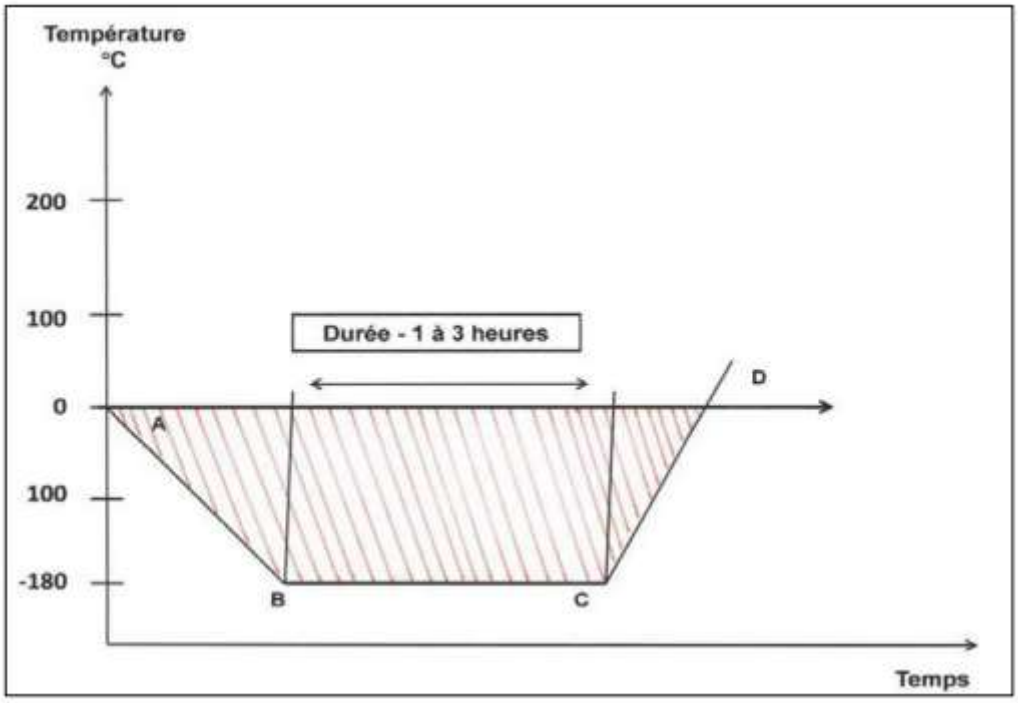


Fig.2.3. Le cycle thermique lors d'une trempe subzéro oucyogénique.

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

IV. Les revenus:

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au détriment de la dureté et de la limite d'élasticité.

Les contraintes résiduelles se forment en raison des grandes différences de température entre le coeur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe). [7]

D'autres contraintes résiduelles, qui varient fortement d'un grain à l'autre, prennent naissance

lors de la transformation martensitique et ont pour origine le changement de la forme (cisaillement des atomes le long des plans cristallographiques) et le changement de volume qu'entraîne cette transformation.

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

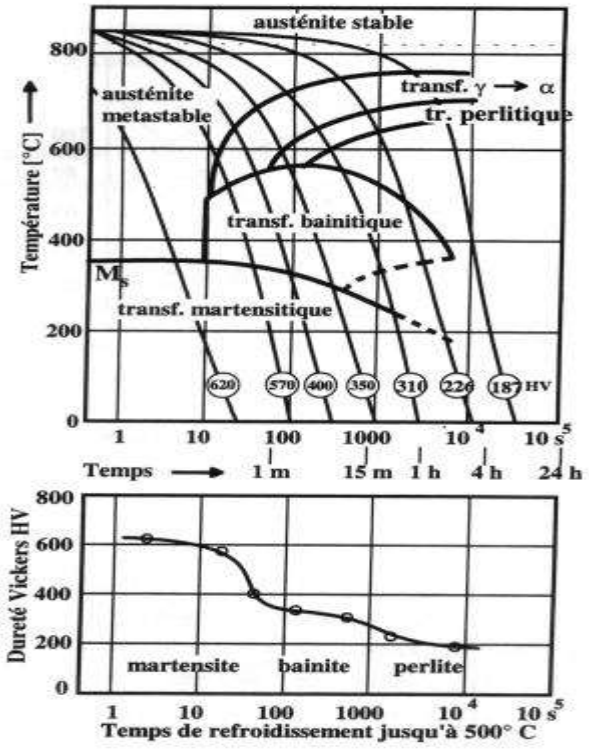


Fig.2.4. Courbe TRC et dureté après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement [6].

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers unétat d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 01 h sont représentées dans le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier. Le diagramme montré en Figure 2.4 correspond à celui d'un acier d'amélioration que l'on utilise pour la réalisation des pièces de construction fortement sollicitées (arbres, engrenages).

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

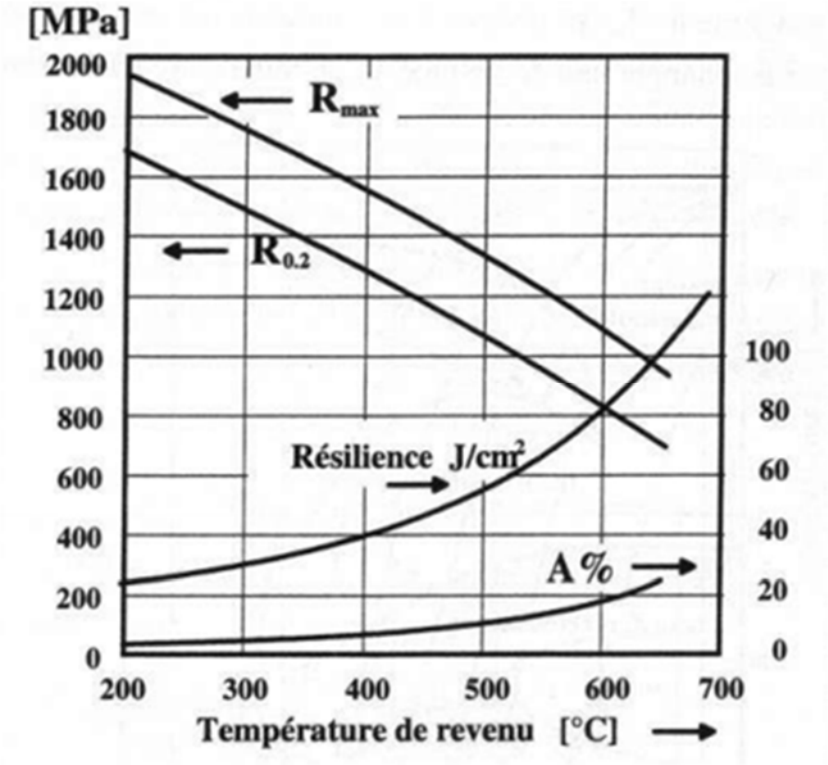


Fig2.5: Diagramme de revenu de l'acie.

V. Les recuits:

Les recuits (« annealing ») consistent en un traitement thermique visant l'obtention d'états proches de l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire la restauration des propriétés originales du matériau. Ce procédé se déroule dans une atmosphère protégée pour prévenir l'oxydation de la surface métallique. Par exemple, quand on fabrique des carrosseries d'automobile, une tôle obtenue par laminage à froid sera trop résistante et pas assez ductile pour pouvoir être emboutie. Dans un tel procédé de fabrication, les déformations plastiques peuvent atteindre 50 %. Si une tôle laminée à froid était utilisée telle quelle pour l'emboutissage, il y aurait des risques de déchirure des tôles et la capacité des presses d'emboutissage devrait être doublée ou triplée.

Le recuit a donc pour but, séparément ou simultanément :

- de supprimer les effets sur la structure :

o de la solidification;

o d'une déformation plastique;

o d'une soudure;

o d'un traitement thermique antérieur.

• de mettre le métal dans un état adouci défini ou de le faire tendre vers un état si la structure a été perturbée par des traitements antérieurs;

• de provoquer la formation de structures favorables à l'usinage ou à la déformation à froid;

• de provoquer la formation d'une structure déterminée en vue, par exemple, de réaliser un traitement thermique ultérieur;

• d'éliminer ou de réduire les contraintes internes de la pièce;

• d'atténuer l'hétérogénéité de la composition chimique.

Le recuit comporte un chauffage et un maintien à une température égale ou supérieur à Ac1, suivi d'un refroidissement généralement lent. Cela dit, on distingue divers types de recuits, soit des recuits d'homogénéisation, de regénération, d'adoucissement, de détente, de sphéroïdisation, de normalisation, de recuit total, etc.

2. Types de recuit :

a)Recuit de normalisation :

Le recuit de normalisation consiste en un traitement thermique des aciers faiblement alliés comportant une austénitisation suivie d'un refroidissement à l'air calme, permettant en particulier d'affiner le grain. Ce traitement comme le recuit complet conduit à des structures ferrite-perlite. Cependant la température de maintien est plus élevée. En outre le refroidissement à l'air calme utilisé est plus rapide que dans le cas du recuit complet. Les structures ferrito-perlitique obtenues correspondent donc à des grains ferritiques fins et à de faibles espacements lamellaires dans la perlite.[8]

Ces microstructures très homogènes peuvent être recherchées dans certaines applications mécaniques et constituent un état initial pour le traitement d'austénitisation avant trempe.

Cycle thermique :

A →B : Chauffage;

B→C : Maintien pendant de 2 à 3 heures à une température comprise entre 700 °C et 1 200 °C;

C →D : Refroidissement lent à l'air.

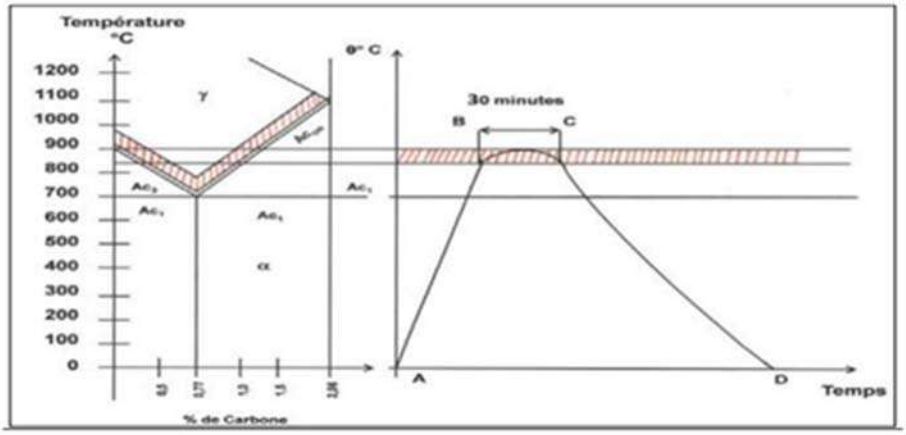


Fig 2.6: Cycle thermique de recuit de normalisation

b) Recuit complet :

Le recuit complet est un traitement qui annule tous les traitements précédents. Bien que semblable au recuit de normalisation, le refroidissement se fait toutefois de manière contrôlée au four car selon la nuance d'acier traitée et l'épaisseur, il se peut que le refroidissement à l'air calme suffise à tremper la pièce ou à donner une structure qui rend l'acier non apte à l'usinage. Les températures et les temps de traitement sont sensiblement les mêmes que pour le recuit de normalisation avec un maintien d'une minute par millimètre d'épaisseur de la pièce. Ce recuit permet de détruire partiellement ou totalement l'effet d'écrouissage que le métal a subi préalablement.[8]

Cycle thermique :

A →B : Chauffage;

B →C : Le cycle thermique est semblable à celui du recuit de régénération sauf que la température de chauffage est un peu plus élevée;

C →D : Refroidissement très lent dans le four.

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

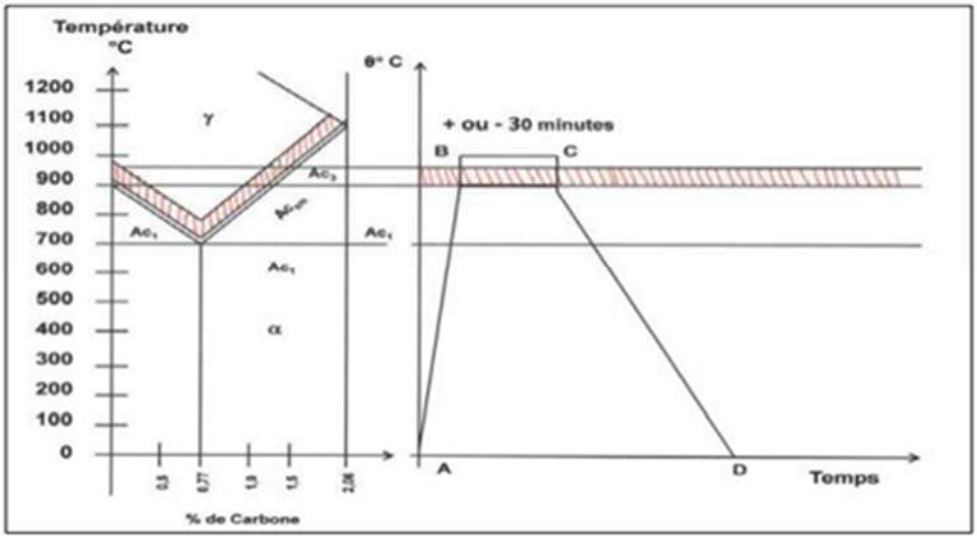


Fig 2.7:Cycle thermique de recuit complet

c)Recuit de sphéroïdisation (ou de coalescence ou de globalisation):

Ce recuit consiste, après chauffage à une température légèrement inférieure à Ac1, à maintenir l'acier à cette température pendant un temps plus ou moins long, puis à le refroidir lentement, de façon qu'il soit dans un état aussi doux que possible et exempt de contraintes. Il s'agit également d'un recuit permettant de faire évoluer la forme géométrique des carbures, telles que les lamelles de cémentite, vers la forme sphérique stable. Il sert également à améliorer la capacité de déformation à froid du matériau traité.[8]

Cycle thermique :

A →B : Chauffage;

B →C : Maintien pendant de 2 à 3 heures à une température comprise entre 700 °C et 730 °C, autour de Ac15;

C →D : Refroidissement très lent dans le four.

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

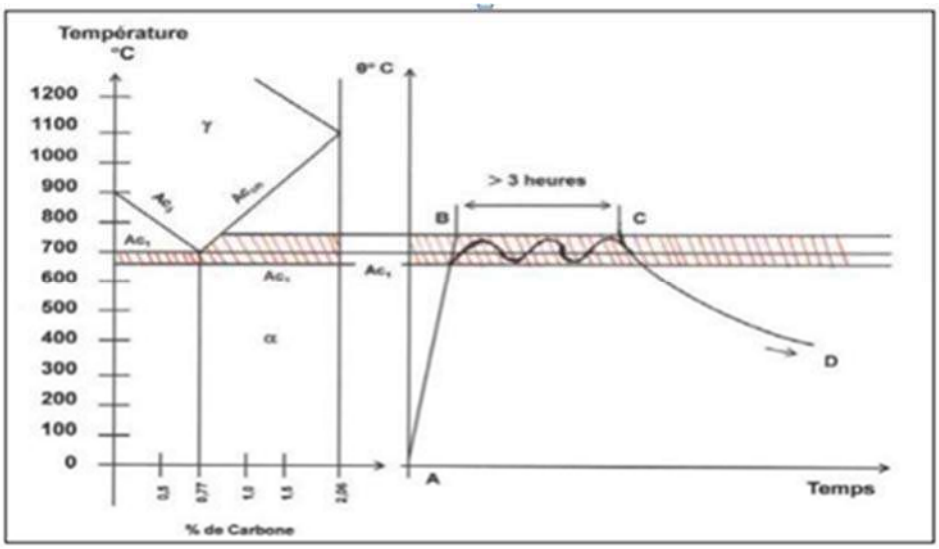


Fig2.7: Cycle thermique de recuit spheroidisation

d) Recuit de recristallisation :

C'est un recuit destiné à faire recristalliser un acier pour obtenir un grain plus fin, après un recuit déstabilisation. On l'utilise également pour régulariser les effets des contraintes provoquées par la déformation à froid à une température inférieure, les parties extérieures des pièces ainsi façonnées étant plus écrouies qu'à cœur. Dans ce cas, la structure cristalline du métal a été d'autant plus modifiée que les contraintes de déformation ont été plus importantes. Ce traitement est absolument nécessaire entre chaque opération de déformation importante. La recristallisation s'accompagne généralement d'une réduction de la résistance et de la dureté d'un matériau, ainsi qu'une augmentation simultanée de la ductilité.[8]

Cycle thermique :

A →B : Chauffage;

B →C : Maintien pendant au moins 5 heures à une température comprise entre 500 °C et 700 °C (température proportionnelle au taux d'écrouissage);

C →D : Refroidissement lent.

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

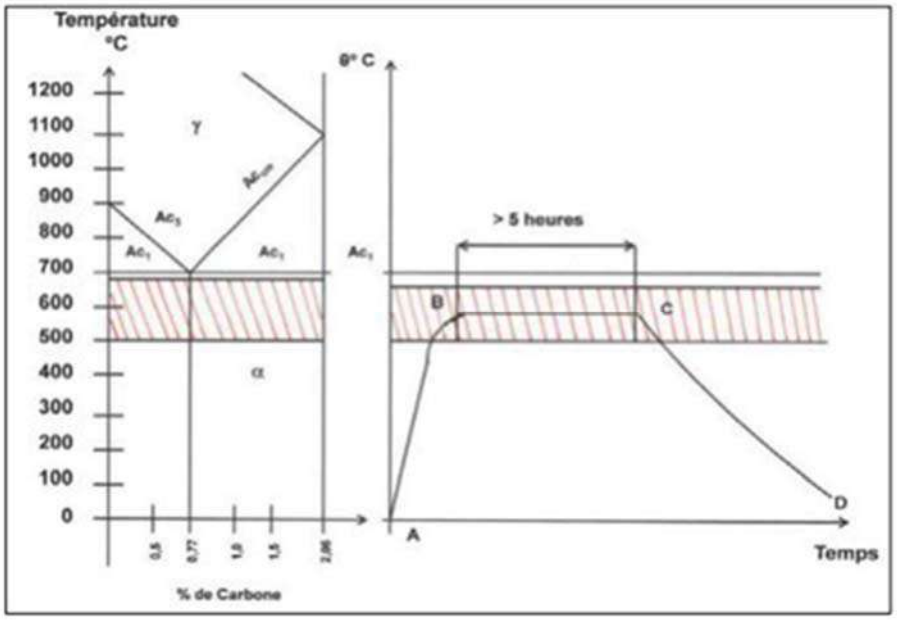


Fig2.8: cycle thermique de recuit de recristallisation

e) Recuit de détente :

Ce traitement est utilisé pour éliminer les tensions des pièces soudées et refroidies rapidement ou des produits fabriqués à froid. Le recuit est obtenu en traitant thermiquement la pièce à une température donnée pendant un certain laps de temps, puis en la refroidissant lentement jusqu'à revenir au seuil de température ambiante. Les paramètres temps et température dépendent de la nature de l'alliage. Il est également très utile pour détendre les contraintes emmagasinées pendant la mise en service Del 'outil. Le recuit de détente est toujours effectué à une température inférieure à la température de transformation.[8]

Cycle thermique :

A →B : Chauffage;

B →C : Maintien de 5 à 10 heures à une température comprise entre 500 °C et 650 °C;

C →D : Refroidissement très lent dans le four (éviter le refroidissement à l'air).

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

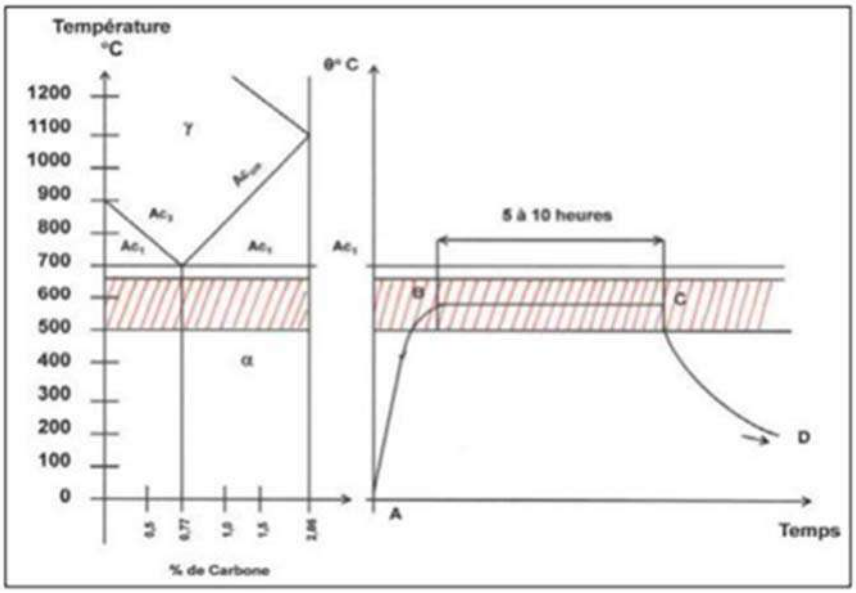


Fig2.9:cycle thermique de recuit de detente

f) Recuit d'homogénéisation :

Le recuit d'homogénéisation s'applique aux aciers bruts de fonderie pour lesquels le refroidissement entraîné une mauvaise répartition des constituants (hétérogénéité). Il a pour but de réduire cette hétérogénéité.

En fait, ce traitement vise à la fois une composition chimique homogène et adoucissement du matériel, par chauffe et retenue prolongée à température élevée.[8]

Cycle thermique :

A →B : Chauffage;

B →C : Maintien pendant plusieurs heures à une température élevée, soit de 1000 °C à 1200 °C = domaine austénitique;

C →D : Refroidissement lent.

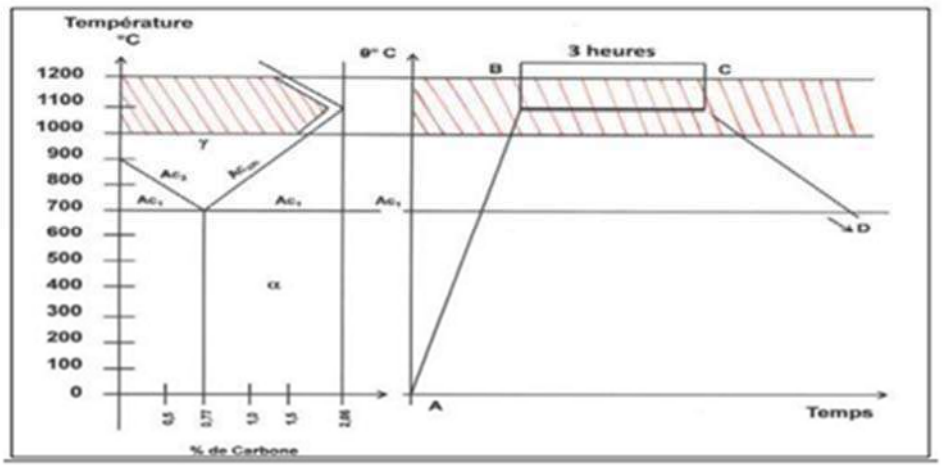


Fig2.10:cycle thermique de recuit d'homogeneisation

VI. L'austénitisation :

L'austénitisation consiste d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés (30-50°C) au-dessus de son point de transformation. Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritique (α, cc) en austénite (γ, cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.[9]

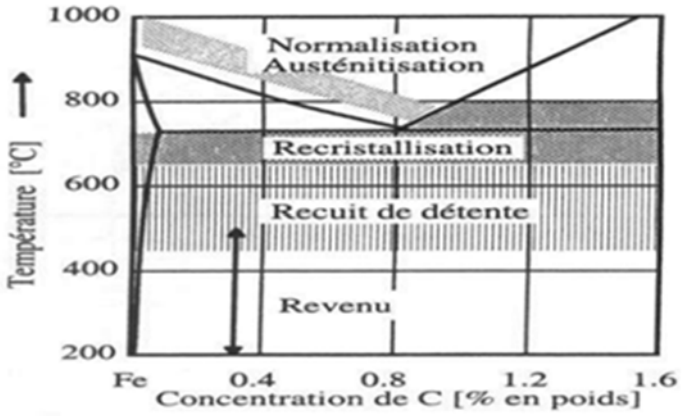


Fig2.11: domaine de temperatures d'austinisation

VII. La cémentation:

La cémentation est le plus ancien traitement thermochimique maîtrisé par l'homme pour augmenter la dureté superficielle des pièces en acier. Pour cela, on augmente la teneur

superficielle en carbone. La diffusion est toujours suivie de trempe à l'huile pour former des structures dures de martensite dans la couche enrichie.

Champ d'application :

→ Pièces d'usinage contenant des éléments tels que : Cr, Mo, Ni, B).

→ Les arbres, les portées de roulement à bille, les engrenages, les plaques d'usure.

→ Aciers : 8620, 4320,9310 et 17CrMo/ acier à faible teneur en carbone.

Cycle thermique :

A → B : Chauffage;

B → C : Plus une pièce demande une couche cémentée profonde, plus la pièce reste longtemps dans la fournaise, ce qui permet de faire diffuser plus de carbone;

C → D : Pour détendre les contraintes induites par le refroidissement rapide et ajuster la dureté finale, un ou deux revenus sont toujours effectués.

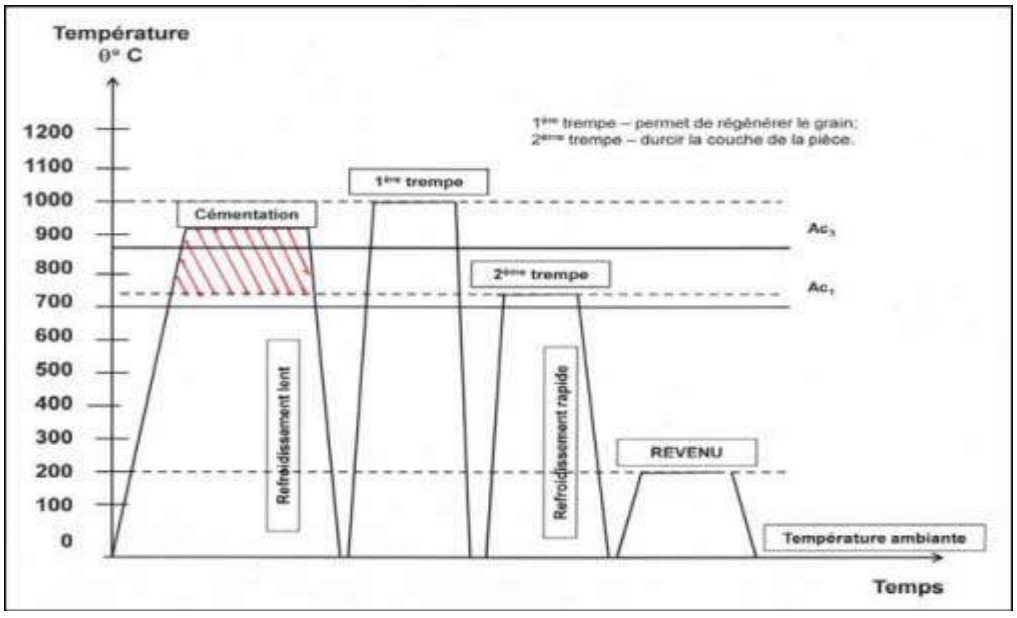


Fig2.12:cycle thermique de recuit cementaion.

Chapitre2 : Les traitements thermiques des aciers

1.1. La cémentation gazeuse:

La cémentation gazeuse utilise soit le procédé à l'azote et méthanol, soit le procédé par générateur endothermique. Dans les deux cas, il se forme dans le four une atmosphère composée de monoxyde de carbone et d'hydrogène. L'opération s'effectue entre 900 °C et 950 °C et dure plusieurs heures.

Il s'agit là d'un procédé chimique de traitement superficiel, qui améliore la dureté de la pièce par diffusion de carbone aux couches superficielles, et qui améliore aussi la résistance à l'usure et à la fatigue. Les pièces de fabrication sont maintenues à une température élevée et sont mises en contact avec une atmosphère riche en carbone, de telle sorte que le carbone puisse se diffuser dans les couches superficielles de la pièce. Ce procédé est généralement réalisé dans un four de trempe sous atmosphère au sein duquel les pièces sont immédiatement trempées après le procédé de diffusion pour transformation martensitique.

Les conditions pour produire une atmosphère de potentiel carbone sont générées en ajoutant du gaz enrichi (gaz naturel ou de l'air dilué sur un gaz porteur endothermique pouvant être constitué à 40 % d'azote – 40 % d'hydrogène – 20 % de monoxyde de carbone (CO) – et moins de 0,1 % de dioxyde de carbone (CO_2).

Enfin, la cémentation gazeuse permet de contrôler très exactement la profondeur de cémentation et elle est plus rapide que la cémentation en caisse, car le temps nécessaire pour chauffer le matériel se trouve économisé. Autre avantage, la cémentation peut être suivie par un cycle de diffusion au cours duquel il n'y a pas admission de gaz, ce qui fait baisser la teneur du carbone en surface et permet d'obtenir une meilleure graduation de la couche de cémentation. Ce procédé nécessite toutefois des investissements importants et son emploi ne peut donc être envisagé que pour des traitements de grandes séries de pièces.[10;11]

2.2. La cémentation « basse pression »:

Les cémentations « basse pression » et « assistée plasma ou ionique » sont utilisées pour le traitement de petites ou moyennes pièces. Elles permettent d'obtenir une bonne qualité de la couche cémentée qui conduit, grâce à l'absence d'oxydation interne, à des caractéristiques de tenue en fatigue supérieures à celles obtenues avec les autres procédés. Il est possible de le réaliser par ce procédé des surcarburations (résistance à l'usure).

Il s'agit d'un procédé relativement moderne utilisé pour cémenter les pièces dans un environnement sans oxydant. Le procédé est réalisé à température élevée dans un four à vide utilisant des gaz pulsés d'hydrocarbure tels que le propane, l'éthylène et l'acétylène en

tant que milieu de cémentation. Les avantages principaux sont les suivants : une surface sans oxydant (IGD), une faible distorsion, une bonne finition, une bonne pénétration pour les formes complexes et les trous, des performances de traitement régulières et des temps de traitement améliorés. Ce procédé ne s'applique pas à tous les aciers; il est principalement utilisé pour les pièces d'injection et de transmission dans les secteurs de l'automobile et de l'aérospatial. Étant donné la pression de trempe relativement faible, le traitement n'est pas universellement appliqué à tous les types d'alliages et d'aciers.

Il existe toutefois des fours sous vide avec trempe à l'huile, et qui sont de plus en plus populaires en termes d'utilisation pour l'exécution de ce traitement.

le tout étant maintenu dans une caisse fermée portée à la température de cémentation (900 °C et 950 °C). Le cément est constitué de carbone amorphe, généralement du charbon de bois (provenant de bois sélectionnés, exempts d'écorces) additionné d'un activateur, le carbonate de baryum $BaCO_3$. Il se présente soit sous forme de granulés reconstitués à partir d'un mélange de charbon de bois (60 à 75 %) et de carbonate de baryum (25 à 40 %) en poudre, soit sous forme de morceaux de charbon de bois finement concassés enrobés de carbonate de baryum en présence d'un lait de chaux comme fixateur. En huit heures environ, on obtient une profondeur de cémentation pouvant atteindre 1,6 mm.[12:13]

VIII. La nitruration:

La nitruration gazeuse implique la diffusion d'azote dans les couches superficielles d'un acier faiblement carboné et faiblement allié en Al et/ou V maintenu à une température élevée. Cela forme une couche nitrurée, qui améliore la dureté superficielle. La nitruration se produit généralement à des températures oscillant entre 504 °C et 566 °C, à partir desquelles le matériau se trouve à l'état ferritique plutôt que dans le domaine austénitique utilisé pour la cémentation.

D'une façon générale, la nitruration est recommandée pour toutes pièces en acier, soumises à l'usure, au grippage, à la fatigue. Comme la température de traitement se situe entre de 504 °C et 566 °C, les déformations sont limitées. Par ailleurs, la nitruration gazeuse, lorsqu'elle est réalisée sur des fours de technologie classique, est traditionnellement réservée aux pièces nécessitant de grandes profondeurs de couche, rectifiées après traitement. Les aciers les plus utilisés sont les aciers dits de « nitruration » tels que 42CrMo4, 40CrMnMo7, 33CrMoV12-9, 41CrAlMo7-10, Nitralloy 135, Nitralloy E2, Nitralloy N1, 4140, 4340, etc.

Ce procédé est rendu possible du fait de la solubilité beaucoup plus élevée de la ferrite dans l'azote par rapport au carbone. Le fait de recourir à des températures inférieures de

traitement et de ne pas devoir fournir une trempe permet d'obtenir des taux de distorsion moindres pour les pièces de fabrication. Règle générale, la zone traitée est de faible épaisseur : 0,2 mm pour un traitement de 10 heures à 525 °C et 0,6 mm pour 60 heures à 525 °C. Ces faibles épaisseurs sont liées à la température de traitement.

La nitruration à l'état ferritique a pour avantage de ne pas interrompre le traitement précédent de la pièce en acier et de ne distordre que peu ou pas du tout la forme finale de la pièce. La nitruration doit être réalisée obligatoirement sur un acier préalablement trempé et incluant le revenu. Cette nitruration doit être réalisée obligatoirement à 50 °F et plus sous la température du dernier revenu de l'acier pour permettre de ne pas diminuer la dureté au cœur de l'acier. Cela signifie que les aciers hautement carbonés précédemment traités thermiquement peuvent être superficiellement durcis par nitruration. En fait, il est normal de terminer tous les traitements thermiques appliqués à la pièce avant la nitruration. L'ammoniac NH3 représente le gaz le plus courant utilisé pour la nitruration dans les fours "batch". Un des inconvénients du traitement de nitruration est que certains cycles de traitement peuvent être très longs, pouvant durer parfois jusqu'à 80 heures.

Enfin, selon les additions d'éléments complémentaires, éventuellement pour des raisons de commodité de mise en œuvre, on parle de nitrocarburation, sulfonitruration, etc. Les traitements de nitruration peuvent être effectuées sous diverses technologies de chauffe : sous atmosphère, bain de sel, nitruration ionique ou par plasma, basse pression.

La nitruration permet d'augmenter la dureté en surface, d'accroître la résistance à l'usure et la vie en fatigue (surface en compression).[14;15]

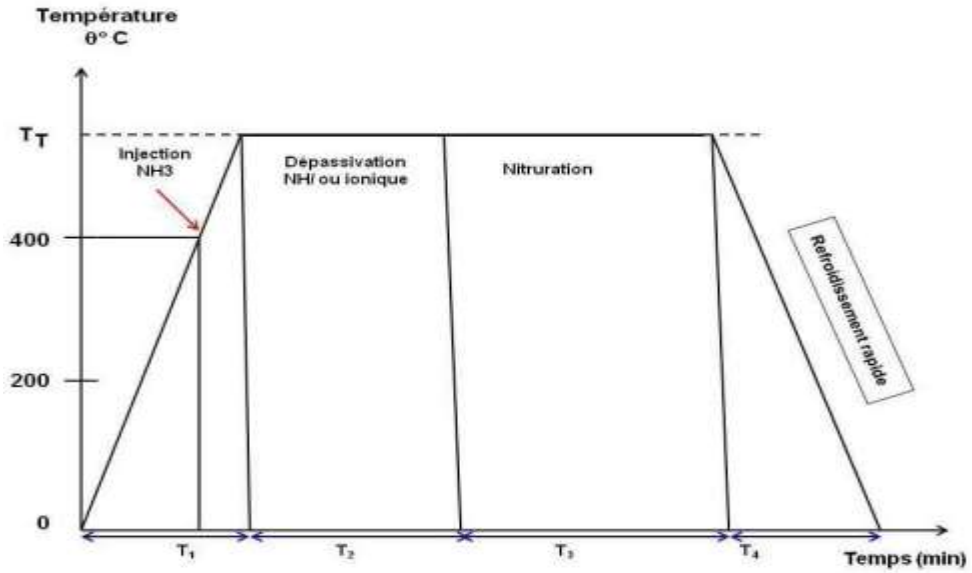


Figure 2.13:. – Le cycle thermique d'un traitement de nitruration

→ Cette figure montre les différentes phases successives d'un traitement de nitruration à basse pression, conformément au procédé selon l'invention. Une fois les pièces disposées sur la structure de support et le four refermé de façon étanche, on procède à une mise sous vide poussé du four à une pression de l'ordre de 10-2 mbar, afin d'obtenir un purgeage du four. On procède ensuite au chauffage des pièces à la pression de 10-2 mbar (phase de montée en température) pendant une période T1.

→ Lorsque les pièces atteignent une température de l'ordre de 400 °C et dans le cas où l'on souhaite effectuer une dépassivation sans bombardement ionique, on procède à une injection d'ammoniac seul (point I) puis on poursuit le chauffage jusqu'à l'obtention de la température de traitement TT sous une pression partielle d'ammoniac de l'ordre de 200 à 400 mbar. On réalise ensuite la phase de dépassivation proprement dite en maintenant les pièces à la température de traitement, sous cette pression partielle d'ammoniac pendant une période T2.

→ Lorsque les pièces atteignent une température de l'ordre de 400 °C et dans le cas où l'on souhaite effectuer une dépassivation sans bombardement ionique, on procède à une injection d'ammoniac seul (point I) puis on poursuit le chauffage jusqu'à l'obtention de la température de traitement TT sous une pression partielle d'ammoniac de l'ordre de 200 à 400 mbar. On réalise ensuite la phase de dépassivation proprement dite en maintenant les pièces à la température de traitement, sous cette pression partielle d'ammoniac pendant une période T3.

→ Le cycle de nitruration se termine par une phase de refroidissement rapide, grâce à une injection de gaz de refroidissement inerte (azote ou azote hydrogéné), la circulation de ce gaz étant assurée par la turbine (période T4).[16]

IX. La nitrocarburation:

La nitrocarburation est une variante du processus de nitruration. Il s'agit d'un processus de diffusion thermochimique où des atomes d'azote, de carbone et, dans une très faible proportion, d'oxygène sont diffusés dans la surface de la pièce en acier, formant une couche de combinaison en surface et une couche de diffusion. Ce processus est réalisé principalement afin d'obtenir une résistance à l'usure de la couche superficielle et améliorer la résistance à la fatigue, car la surface est en compression. Les avantages du processus incluent la capacité de durcir les matériaux qui ne sont pas prétraités, la température relativement basse du processus qui minimise la déformation et le coût relativement économique par rapport à la cémentation.

Les industries concernées par ce type de traitement sont entre autres : pétrole et gaz, soupape, pompe, équipement agricole, automobile, emboutissage, textile, extrusion et moulage par injection et composants d'armes à feu. Les pièces principalement concernées sont : les engrenages et arbres de pignon, les robinets, sièges, billes, tiges, régulateurs, les composants de pompe - pistons, cylindre, les hacheurs de moissonneuse-batteuse, séparateurs, transfert de récolte, composants de coupe, les axes de boîte de vitesse, pièces d'embrayages, pompes à huile de moteur diesel, engrenages, vilebrequins et arbres à cames, etc.

La couche de combinaison est résistante à la corrosion et à l'usure, sans être fragilisée, contrairement à son équivalent dans le processus de nitruration. Étant donné qu'elle fournit une partie essentielle des propriétés requises par le processus, elle ne doit pas être éliminée par rectification ultérieure. En dessous de la couche de combinaison, la couche nitrurée améliore de façon significative la résistance à la fatigue du composant.[17;18]

X. La carbonitruration:

La carbonitruration est un traitement de diffusion généralement effectué entre 845 °C et 870 °C dans une atmosphère gazeuse, en ajoutant 0,7 à 1,2 % de carbone et 1,0-5,0 % (<5 %) d'azote (NH3) à la surface des aciers au carbone ou des aciers faiblement alliés. Après le temps de diffusion, les composants sont directement trempés à l'huile. La profondeur cémentée atteinte n'est généralement pas supérieure à 0,7 mm environ et dépend non seulement des profondeurs de carbonitruration, mais aussi de la température de durcissement, la vitesse de trempe, la trempabilité de l'acier et les dimensions du composant.
Une trempe peu énergétique, généralement à l'huile ou à l'air, est effectuée soit à la sortie des pièces du four après refroidissement, soit après un deuxième chauffage. Le traitement thermique est terminé par un revenu à basse température, située entre 150 °C et 200 °C, pour les plages de profondeur de couche cémentée les plus profondes, ce qui permet de réduire la fragilisation en fonction des circonstances tribologiques.

Il y a une certaine analogie avec le traitement de cémentation. La cémentation, rappelons le, consiste à enrichir en carbone la zone superficielle de pièces en acier à bas carbone, puis à les tremper de manière à obtenir une couche martensitique dure, résistant à l'usure et un cœur tendre et ductile, susceptible d'absorber des chocs. Ce traitement s'applique à des aciers de cémentation qui contiennent des éléments d'alliage destinés à améliorer la trempabilité et à conférer à la pièce une certaine résistance à cœur. Par contre, lorsqu'on désire obtenir un résultat analogue avec des aciers qui se prêtent moins bien à la trempe, tels que des aciers de décolletage, on procède à un traitement de carbonitruration. Dans ce cas, on ajoute à l'atmosphère de cémentation une quantité d'ammoniac généralement

inférieure à 5 % du volume. À la température de traitement, l'ammoniac se décompose en azote et en hydrogène. Une partie de l'azote pénètre dans le réseau cristallin de l'acier en provoquant entre autres une augmentation importante de la trempabilité. Les pièces carbonitrurées peuvent donc ensuite être trempées.

Un inconvénient non négligeable est que, si l'azote augmente la trempabilité de l'acier, il abaisse fortement le point Ms (« Martensite Start ») et augmente donc le volume d'austénite résiduelle qui peut être, par suite, très élevé, et cette austénite n'est guère favorable, aux caractéristiques mécaniques, à la tenue en fatigue et à la stabilité dimensionnelle des pièces.

La carbonitruration est principalement appliquée pour obtenir une couche cémentée dure et résistante à l'usure. La diffusion de carbone et d'azote augmente la trempabilité du carbone ordinaire et des aciers faiblement alliés et crée une couche cémentée plus dure que la cémentation. Le processus de carbonitruration est particulièrement adapté pour la production de série de petits composants. La déformation est réduite en raison de la faible température nécessaire pour la carbonitruration par rapport à la cémentation. La vitesse de trempe douce réduit le risque de tapure de trempe.

Un vaste éventail d'aciers peuvent être carbonitrurés, des aciers au carbone ordinaire aux aciers doux (avec une teneur en aluminium réduite), en passant par les aciers faiblement alliés avec un maximum variant de 0,25 % à 0,50 % de carbone, les aciers de décolletage et les aciers frittés. La carbonitruration est généralement appliquée aux pièces de formes complexes. Il s'agit d'un traitement de plus en plus, prisé par les industries exigeant une grande précision pour leurs pièces (véhicules automobiles et aéronautique).[19;20]

Chapitre3 : Résultats et Discussion

Introduction :

Le but de notre travail consiste à définir les caractéristiques mécaniques de l'acier 100 Cr 6 et savoir l'influence du traitement thermique (Trempe et Revenu) sur la dureté et la structure de l'acier.

Acier 100 Cr 6 :

Fait partie de famille des aciers faiblement alliés qui peuvent être forgés, acier à outil, au chrome à haute teneur en carbone. Aciers à roulements Les aciers à roulements doivent satisfaire à des exigences très rigoureuses en ce qui concerne les inclusions non métalliques. Leur présence dans la partie sollicitée, provoque une concentration de contraintes qui entraîne une rupture de fatigue prématurée Les bagues, rouleaux et bielles, exigent dans les conditions de travail, une dureté, une tenue à l'usure et une résistance, élevées. A l'état recuit, ces aciers ont une structure perlitique à grains fins, assez usinable avec une dureté d'environ 187 HB. Après trempe à l'huile et revenu à basse température (200°C) la dureté atteint (61 à 66) HRC. Les bagues, les rouleaux et les bielles sont fabriquées en acier à haut carbone contenant du chrome. Dans le cas de grosses pièces, on utilise comme addition, du chrome-manganèse silicium ou du chrome-nickel (aciers de cémentation). Pour les roulements travaillant dans des milieux agressifs, on emploi l'acier inoxydable à 1,2 % C et 1,4 % Cr. Dans le tableau, ci-dessous, nous avons porté quelques nuances d'aciers pour roulements et leurs principales applications.

Nuances DIN	Rm (daN/mm²)	Dureté (HRC)	Applications
105 Cr 4	70	63 à 67	Roulements à bagues de 10 à 17 mm de diamètre.
100 Cr 6	70	63 à 66	Bagues de roulements à billes, disques et anneaux de butées à billes et à galets, sièges de roulements.
100 CrMn 6	73	63 à 66	Bagues de plus de 30 mm d'épaisseur de paroi à l'état fini.
X90 CrMoV 18	85	57 à 59	Roulements inoxydables, rouleaux à billes, à galets.

Tableau 3.1 : caractéristiques mécaniques de l'acier 100Cr6

La composition chimique :

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%
0.93-1.05	0.15-0.35	0.25-0.45	≤ 0.025	≤ 0.03	1.35-1.60	≤ 0.10

Tableau 3.2.: composition chimique de l'acier 100Cr6.

Chapitre3 : Résultats et Discussion

Matériels utilisés :

1.La scie à métaux :

Elle permet de découper le metal en faisant défiler une lame dentée sur un seul coté qui forme un ruban continu. Elle est particulièrement utile lorsque l'on veut des découpages complexes puisqu'elle permet des coupes qui ne sont pas rectilignes.



Fig.3.1. Un scie à métaux.

2.La machine de tour :

Elle est une machine outil. Il traite principalement diverses surfaces rotatives et les surfaces d'extrémité des corps rotatifs. La motion principale de la tour de moteur est le mouvement de rotation de la broche et le mouvement d'avance est le mouvement linéaire de l'outil.

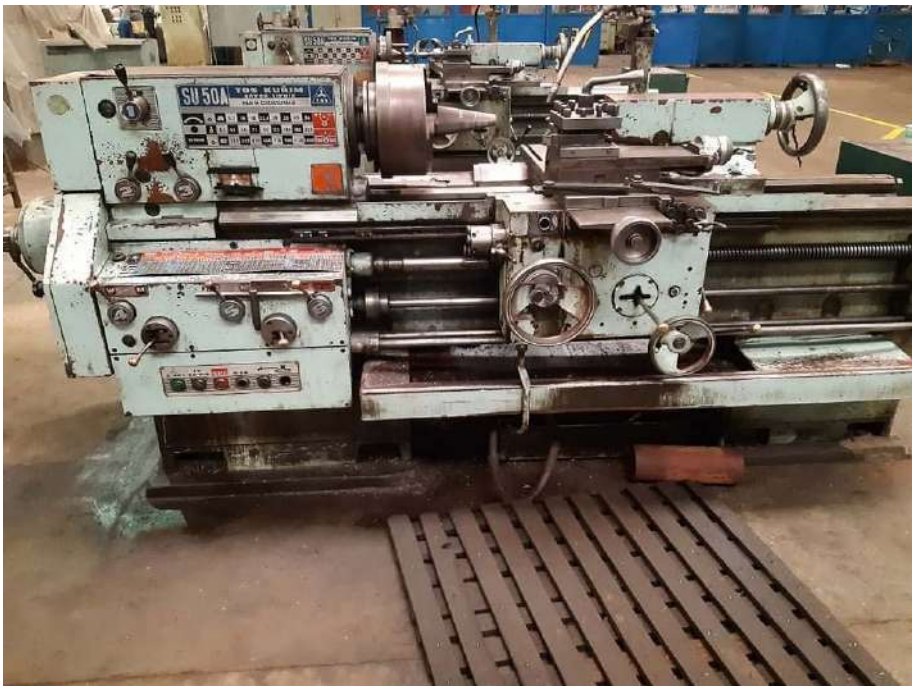


Fig.3.2. Une machine à tour.

3.Le four pour le traitement thermique :

On a appliqué un trempe et revenue dans un four thermo scientifique. C'est un four à moufle compacts de table de fonction avancée de contrôle électrique. L'isolant en céramique offre efficacité énergétique maximale. La température maximale est de 1600 °C.



Fig.3.3. Le four pour le traitement thermique.

4.La polisseuse :

On a fait un polissage à l'aide d'une polisseuse de modèle struers planopol_v, et papiers abrasifs. Ses papiers sont montés sur des tourets de polissage la vitesse est de 300-400 tr/min équipés d'un système d'arrosage à l'eau dont courante, pour l'échauffement des échantillons.



Fig.3.4. La polisseuse.

5.Microscope optique :

Le microscope optique ou microscope photonique est constitué d'un tube qui possède à ses deux extrémités des lentilles. Le premier groupe de lentilles, dirigé vers l'objet à examiner, constitue l'objectif. Il donne une image réelle, inversée et agrandie de l'objet. Le deuxième groupe de lentilles, dirigé vers l'œil de l'observateur, est appelé l'oculaire **;** il fonctionne comme une simple loupe et grossit l'image précédente. On obtient alors l'image définitive virtuelle, plus ou moins fortement grossie et renversée de l'objet initial.

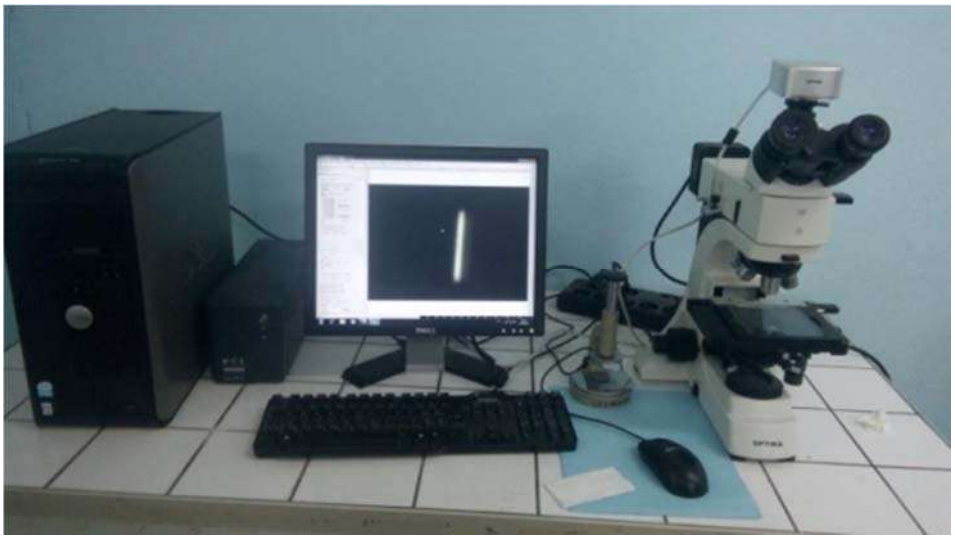


Fig.3.5. Le microscope métallographique triloculaire.

6.Le duromètre: L'essai consiste à faire pénétrer en appliquant une force F un pénétrateur ayant une forme de bille diamètre D, généralement du carbure poli ou céramique trempé, dans le métal à tester.

7.Le duromètre Rockwell mesure la profondeur permanente de l'empreinte produite par une force / charge spécifiée sur un pénétrateur spécifié. Cet essai ne nécessite qu'une préparation minimale de l'échantillon, rendant sa réalisation plus rapide et plus facile dans de nombreuses industries à travers le monde.



Fig.3.6. Le duromètre.

Chapitre3 : Résultats et Discussion

Résultat expérimental :

1.Nos échantillons :



Fig.3.7. Les échantillons utilisés.

La première étape de notre travail consiste à couper nos échantillons à l'aide de scie à métaux et une machine de tour en 8 cylindres de 16mm de diamètre, voire figure. On les pointé des numéros de 1 à 8. Nous avons préparé 8 échantillons d'acier 100Cr6 qui ont les mêmes caractéristiques géométriques.

Ensuite, nous avons effectué un traitement thermique (Trempe), en chauffant dans un four les 8 échantillons jusqu'atteindre la température de 760°c. Après, nous avons effectué un maintien de 32 min. ensuite, nous avons enlevé 4 échantillons et nous avons mis 2 parmi les 4 dans un bain de l'huile et 2 dans un bain d'eau.

Les 4 échantillons restant dans le four, ont été chauffé jusqu'à une température de 900°c suivi par un maintien de 32 min. après nous avons les enlevé, et nous avons trempé 2 échantillons dans un bain de l'huile et 2 dans un bain d'eau.

2.Le mécanisme de la trempe :

À partir de diagramme d'équilibre Fe-C, on a choisis les températures de trempe des échantillons, on a chauffé l'échantillon à une température supérieurs à ces points de transformation critique.

- Chauffage lent jusqu'à 760 °C, suivi d'un maintien de 32min, après un chauffage lent jusqu'à 900 °C, suivi d'un maintien de 32min.
- Maintient en chauffe à cette température, pendant 32 min, cette phase est utile, pour permettre un austénitisation complète. La durée de maintient dépend du volume de la pièce,
- Refroidissement rapide à l'huile.
- Refroidissement rapide à l'eau.

3.Le processus opératoire du revenu :

-Chauffage vers 200 °C et 400 °C selon les résultats souhaités et le pourcentage de carbone

-Maintien en température (la durée est aussi fonction du volume et dimension de la pièce à traiter)
-Refroidissement lent (à l'air libre).

Echantillon	Température de traitement	Trempe à l'huile	Trempe à l'eau	Revenu 200°	Revenu400°
1	760°	X		X	
2	760°	X			X
3	760°		X	X	
4	760°		X		X
5	900°	X		X	
6	900°	X			X
7	900°		X	X	
8	900°		X		X

Tableau 3.3.: Les différents traitements thermique appliqués sur nos échantillons de l'acier 100Cr6.

4.Le polissage : dans notre cas le polissage est obtenu manuellement, il vise à rendre les surfaces lisses et polies comme un miroir, pour faciliter la réflexion des faisceaux. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l'aide de papiers abrasifs revêtus de carbure de silicium (S1C) à indice de granulation progressif 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, jusqu'au 2400 (papiers de finition). Ces papiers sont montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est de 300 tr/min, équipés d'un système d'arrosage à l'eau courante, pour éviter l'échauffement des échantillons.
La diminution da la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'afficher progressivement l'état de surface et de diminuer la rugosité moyenne, compte tenu de la **différence de dureté existant entre le carbure et la matrice métallique, la surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines**



Fig.3.8. Le polissage des échantillons.

5.Observation au microscope optique : on fait l'observation microscopique à l'aide d'un microscope métallographique pour les échantillons qu'ont les fait un revenu de 400°C seulement et nous avons trouvé les résultats suivantes :

• **Pour l'acier 100Cr6 Trempé à 760°C à l'eau:**

La structure est composée de deux constituants structuraux de Austénite+Cémentite se précipitent au niveau de joints de grains.



Fig.3.9. L'acier 100Cr6 trempé à 760°C à l'eau.

• **Pour l'acier 100Cr6 Trempé à 760°C à l'huile:**

La structure est composée de deux constituants structuraux de Austénite+Cémentite se précipitent au niveau de joints de grains.

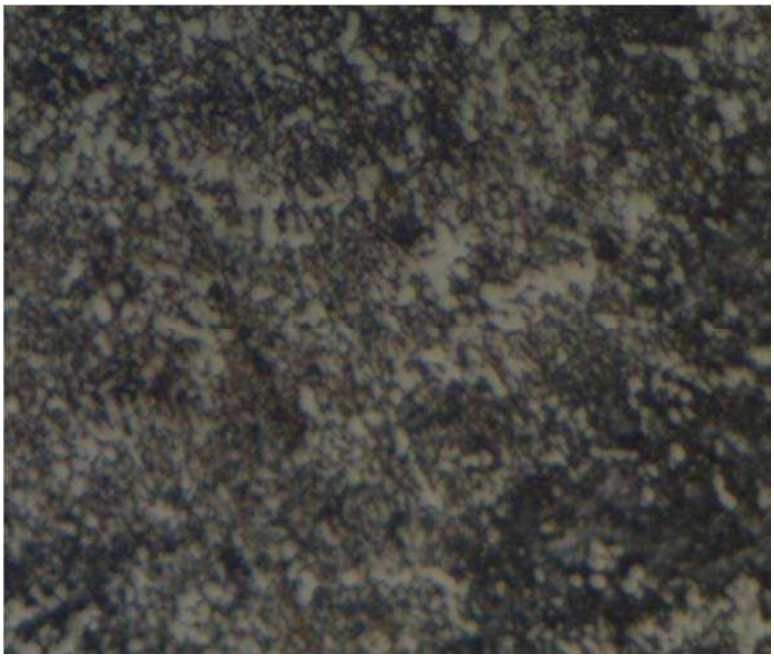


Fig.3.10. L'acier 100Cr6 trempé à 760°C à l'huile.

• **Pour l'acier 100Cr6 Trempé à 9000°C à l'eau:**

La structure est composée de deux constituants structuraux de Austénite se précipitent au niveau de joints de grains.



Fig.3.11. L'acier 100Cr6 trempé à 900°C à l'eau.

• **Pour l'acier 100Cr6 Trempé à 900°C à l'huile:**

La structure est composée de deux constituants structuraux de Austénite se précipitent au niveau de joints de grains.



Fig.3.12. L'acier 100Cr6 trempé à 900°C à l'huile.

6.Mesure de la dureté:

Nous avons mesuré la dureté des échantillons à l'état recuit à l'aide d'un appareil de mesure de la dureté on a obtenu les résultats suivant :

échantillons	Température de trempe	Trempe	Revenu	Dureté
6	900	Huile	400	54 HRC
8	900	Eau	400	49 HRC
2	760	Huile	400	187 HB
4	760	Eau	400	197 HB
	860	Huile	400	65 HRC
	860	Eau	400	66 HRC
	790	Huile	200	40.3 HRC [7]
	790	Huile	/	57 HRC [7]

Tableau 3.2.: La mesure de la dureté de l'acier 100Cr6.

Concernant les valeurs de dureté des échantillons de 860°C sont pris à partir de la littérature.

A partir des résultats obtenus, nous observons que en augmentant la température de trempe la dureté augmente.

Chapitre3 : Résultats et Discussion

Interprétation des résultats :

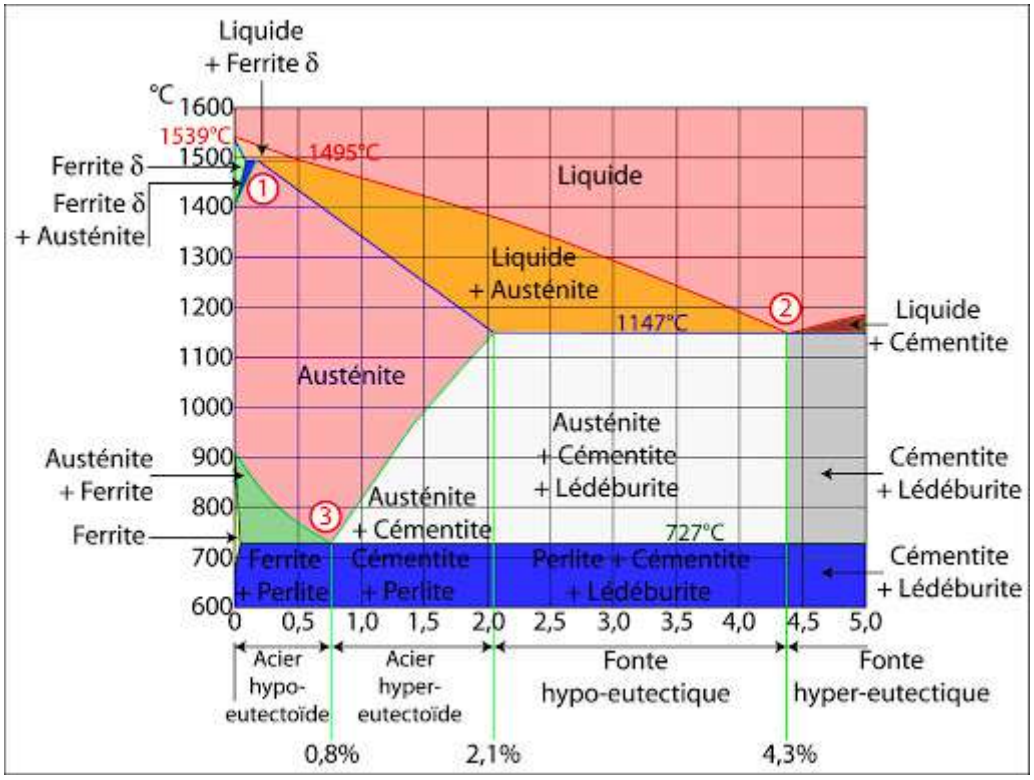


Fig.3.13. Diagramme de phase de l'acier 100Cr6.

L'acier 100Cr6 contient 0.93% <C%<1.05% en suivant leur transformation structural en fonction de la température, nous permis de extrait ces informations :

1. L'acier 100Cr6 est un acier hyper-eutectoide.
2. Pour une trempe de 760°C, la structure est Austénite+Cémentite.
3. Pour une trempe de 900°C, la structure est 100% Austénite.

Ces résultats confirment nos résultats.

Conclusion générale

Conclusion générale:

A l'aide des différentes méthodes et techniques, nous pouvons critiquer et même faire le choix du matériau le mieux adapté à notre besoin. Ainsi, nous pouvons comprendre et décider l'utilisation de tel ou tel traitement thermique de l'acier **100Cr6.**

Des traitements thermiques dans la masse ou en surface d'un matériau permettent ainsi de modifier ces caractéristiques telles que la trempe, le recuit ou encore le revenu.

Dans cette d'étude nous avons mis en évidence l'influence de traitement thermique sur les caractéristiques de l'acier **100Cr6.** On a montré que le changement de ces caractéristiques est lié au choix de la température de revenu, du temps de maintient et du fluide de trempe.

Les critères de choix se feront donc suivant les fonctions principales de la pièce en service, c'est-à-dire ces conditions de sollicitation, son mode de mise en charge, le milieu environnant, la température d'utilisation, etc.

La conclusion c'est de trouver à la fin de ce travail, une possible corrélation entre la microstructure et le comportement mécanique, après application des traitements thermiques ainsi que l'influence de température de revenu sur les caractéristiques mécaniques et la microstructure de l'acier **100Cr6.**

Recherche Bibliographique

[1] BENSAADA, SAID. "traitements thermiques, classification et désignation des aciers et fontes." Université de Biskra (2003).

[2] SAKER Akram. Etude des causes de dégradation prématurée d'un marteau de concassage fabriqué en acier riche en chrome. (2018).

[3] Si Hadj Mohand, Chafiaa. Modélisation et influence des paramètres de cisaillement sur la réponse des structures. Diss. Université Mouloud Mammeri, (2010).

[4] Colombié, Michel. Matériaux métalliques-2ème édition. Hachette, (2008).

[5] BENMOUSSA RYMA « Caractérisation mécanique de l'acier 100Cr6 » UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA (2018).

[6] G.BERANGER, «Génialité Dès L'acier», Epp 22. Sollac. (1996).

[7] A. ROOS, «Précis De Métallurgie Appliquée». Edition Technique Et Documentation Lavoisier (1982).

[8] R.STEINER, «Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys Volume De 10eme Edition Metals Handbook International American Society of Materials, (1990).

[9] Centre de formation professionnelle de La Baie, Cahier de notes de cours du DEP Fonderie – Module 18 section 2 – Application de traitements thermiques, 2012.

[10] Y.BARKAT, « Etude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines », Mémoire Master En Génie Chimique, Université Mohamed Khider Biskra, 2016.

[11] A. BOUMARAF, « Effet De Soudage Sur La Structure D'un Acier Faiblement Allié (Bs2) Utilise Dans La Fabrication Des Bouteilles A Gaz », Mémoire De Master En Génie Mécanique, Université Mohamed Khider Biskra, 2015.

[12] R.VILLEGAS, «Genèse De La Ferrite Aciculaire Dans Les Aciers A Moyen Carbone Microalliés Au Vanadium. Morphologie Fractale En Relation Avec Les Propriétés Mécaniques. », Thèse De Doctorat De Ltnpl (Institut National Polytechnique De Lorraine), (2007).

[13] C.E .DERFOUFE, « Cour De Technologie», 1 er Année Duea, (2005-2006).

[14] H. Hamadache ; Concepts Fondamentaux de la Mécanique Des Matériaux, éditions dde l'université de Badji Mokhtar, 2007.

[15] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007

[16] M .ABDERRAHIM, «Etude Du Comportement En Fatigue Des Aciers Pour Pipelines », Mémoire De Master En Génie Mécanique, Université De Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, (2013).

[17] Arfaoui Ali, Chaker Med Amir, « cours de matériaux métalliques »,2009/2010.

[18] F. BOUNABE «Evolutions Microstructurales Lors Des Traitements Thermiques Imposés A Un Acier Faiblement Allié (53mnsi4) », Mémoire D'ingénieur En Métallurgie, Université De Mouhamed Kheider, Biskra, (2013).

[19] G.MURRY, «Généralités Sur Aciers», Techniques De L'ingénieur, Centre Français D'exploitation, (2002).

[20] G.MURRY, « Transformations Dans Les Aciers », Techniques De L'ingénieur, Ml 115, Centre Français D'exploitation (2002).

[21] H. Hamadache ; Concepts Fondamentaux de la Mécanique Des Matériaux, éditions dde l'université de Badji Mokhtar, 2007.

[22] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007.

[23] Fatima Zohra Lemmadi, thèse de magistère, Rapporteur Mr. A. Chala, Univ. De Biskra.

[24]. Les informations concernant la trempe martensitique proviennent du site www.metallurgieaide.com/trempe_318.htm.

[25]. Les informations concernant la trempe bainitique proviennent du site www.metallurgie-aide.com/trempe_318.htm

[26]. Les informations concernant la trempe austénitique ou l'hypertrempe proviennent du site www.soloswiss.fr/traitement_thermique_solo/la-trempe-et-le-revenu/index.html.

[27] guide_hors_production_operateur_traitement_thermique Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2015. Dépôt légal – Bibliothèque et Archives Canada, 2015

[28]. Les informations concernant la trempe subzéro proviennent entre autres du site www.soloswiss.fr/traitement_thermique_solo/la-trempe-et-le-revenu/index.html ainsi que de

www.a3ts.org/wp-content/uploads/fiches-techniques/A3TS-TRAITEMENT-PAR-LE-FROID.pdf.

[29]. Information tirée d'un document disponible sur le site www.technologuepro.com, intitulé Chapitre 4 « Les transformations à l'état solide des alliages Fe-C », p. 57.

[30] guide d'auto – apprentissage pour les operateurs on treatment thermique . par Dr. Raymond langevin.

[31] J.Philibert, A.Vignes, Y. Bréchet et P. Commrade, Métallurgie du mierai au matériau Masson 1998 Paris, p. 717 M. Massin, "Métallurgie Pratique pour Mécaniciens", tome 1, Pyc édition 1982, p 87-162. H-J. Bargel und G. Schultze (ed.), Werkstoffkunde, Springer Verlag 2000

[32]. INRS, Ateliers de traitement thermique – Hygiène et sécurité. Cahiers de notes documentaires, No183, 2e trimestre 2001, p.6.

[33]. Les informations concernant la cémentation gazeuse proviennent du site www.soloswiss.fr/traitement_thermique_solo/la-trempe-et-le-revenu/index.html.

[34]. Les informations concernant la cémentation basse pression proviennent en partie du site www.eurotherm.tm.fr/industries/heat-treatment/library/metallic-alloys/

[35]. Claude LEROUX, Christian TOURNIER, Dominique GHIGLIONE. Traitement des métaux, tiré de www.techniquesingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-traitement-des-metaux-tiamd/archive-1/cementationcarbonitruration-m1226/traitement-en-milieu-solide-cementation-solide-ou-cementation-en-caissem1226niv10002.html

[36]. Les informations concernant la nitruration proviennent en partie du site www.eurotherm.tm.fr/industries/heattreatment/library/metallic-alloys/

[37]. INRS, Ateliers de traitement thermique – Hygiène et sécurité. Cahiers de notes documentaires, No183, 2e trimestre 2001, pp.6 et 7.

[38]. La description du traitement provient du document suivant : Jean-Pierre SOUCHARD. Procédé pour la nitruration à basse pression d'une pièce métallique et four pour la mise en œuvre dudit procédé [en ligne] www.google.com/patents/EP0707661B1?cl=fr.

[39]. Pour une description du cycle thermique concernant la nitrocarburation voir : Claude LEROUX, Christian TOURNIER, Dominique GHIGLIONE. Nitruration, nitrocarburation et dérivés, []en ligne] http://197.14.51.10:81/pmb/collections/Techniques%20de%20lingenieur/ticd4/md/md1/m1227.pdf

[40]. Les informations sur la nitrocarburation proviennent du site www.bodycote.com/fr-FR/services/heattreatment/case-hardening-with-subsequent-hardening-operation/carbonitriding.aspx.

[41]. Pour une description relativement complète du cycle thermique concernant la nitrocarburation, voir le site : Jean BERLIER' Aymeric GOLDSTEINAS et Xavier DOUSSOT, Procédé et four de carbonitruration à basse pression [en ligne] www.google.com/patents/EP1885904B1?cl=un&hl=fr

[42]. Les informations sur la carbonitruration proviennent du site www.bodycote.com/fr-FR/services/heattreatment/case-hardening-with-subsequent-hardening-operation/carbonitriding.asp

[43] A. Iost, R. Bigot, L. Boudreau, matériaux et techniques, l'essai de dureté Vickers : applications et influence de la charge.77-79, 1995.

[44] Mécanique de la rupture les essais et leurs significations, Ecole des mines, Nancy, Éditons 1988.

[45] M. GRUMBACH et al, Mitaux, Corrosion, Industrie, 58, 690, 69-74,1983.

[46] M. GRUMBACH, "Les essais de dureté" dans Propriétés d'emploi des aciers. Etudes de bases. C. I. OTUA., 1977.

[47] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007.

[48] J. Mandel, propriétés mécanique des matériaux, Editions Eyrolles, 1978.

[49] BENMOUSSA RYMA « Caractérisation mécanique de l'acier 100Cr6 » UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA (2018).