الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Département du Génie mécanique

Mémoire de Fin d'étude

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : science des matériaux

THEME

Vue panoramique sur l'acier en général Elaboration, Obtention, Traitements thermiques et mécaniques, Essais et Emploi

Application :

Cas de l'acier X20Cr13(X20C13)

Proposé et dirigé par : - Mr SELATNIA TAHAR

Préparé présenté par : - LAMIRI KAMEL

- BENSAAD MOHAMED

Année Universitaire 2015-2016

Dédicaces

A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet:

mes frères, et mes sœurs, sans oublié ma grand-mère que j'aime.

A toute ma famille, et mes amis,

A mon binôme kamel et toute la famille Bensaad et toute la classe SDM.et mes amis Hamza khelifi, Abdlatif Med, Medeni Med, Marouan Maasmi, Aissa Naamoun, Akram t, khaled, Ismail, Hocine Aissou, Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Remerciements

On remercie notre encadreur monsieur Selatnia Tahar pour l'encadrement et suivi pour la réalisation de Notre mémoire.

On remercie monsieur Hbireche pour l'aide utile qu'il a pu nous apporter.

On remercie les ingénieurs et les techniciens de l'unité maintenance et fonderie de l'entreprise povale de barouaghia, pour leur soutien.

On remercie les membres de notre jury pour l'effort fourni afin d'examiner et d'évaluer notre travail.

Finalement, On remercie tous les enseignants qui ont contribué à notre formation l'université.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mon père à titre posthume, pour tant de sacrifices consentis, mais le seigneur en a décidé autrement.

A ma mère : ton souvenir reste à jamais gravé dans ma mémoire.

Paix à ton âme.

A vous, aïchatou, ornella, elysée-marcel et guy-maurel, qui m'avez soutenu avec amour et tendresse pendant ce travail, malgré mes longues et répétées absences.

A vous mon frère et ma soeur.

A vous mes oncles.

SOMMAIRE

Introduction

Chapitre I : Notion de minerai

1.1 les divers états de la matière……..…..1

1.1.1 Caractéristiques des solides……..……1.

1.1.2 Caractéristiques des liquides…….……1

1.1.3 Caractéristiques des gazeux……..1

1.2 constitution de la matière ……1

1.3 introduction aux minerais ……4

Chapitre II : la sidérurgie.

2.1 le haut fourneau……6

2.2 fours électriques à fonte <<TYSLOND HOLE>>……...……..14

2.3 Transformation fonte-acier……16

2.4 Acier thomas……..……18

2.5 Acier à l'oxygéné…….19

2.6 Acier Martin……..22

2.7 électrosidérurgie……24

2.7.1 four à arc (caractéristiques)…….23

2.7.2 le four à induction ……...…27

2.8 Application du vide en aciérie……..29

2.9 la coulée de l'acier ……...33

2.10 les défauts des lingots…….34

2.10.1 Retassure ……..……..34

2.10.2 Ségrégation……35

2.10.3 Liquation……..……..35

2.10.4 Soufflures……..…….35

2.10.5 Criques ……..36

2.10.6 Tapures……36

2.10.7 Flocon …….36

2.10.8 Gouttes froides……36

2.11 Ferro-alliages ……36

Chapitre III : Essais des matériaux

3.0 Étude de principaux essais……..56
3.1 Essais de traction : essais statique……57
3.1.1 Détails des éprouvettes ……..57
3.1.2 Diagramme de l'essai de traction ……..……58
2.1.3 Facteur de sécurité n ……60
3.2 Essais de dureté ……..61
3.2.1 Essai Brinell……62
3.2.1.1 Relation entre la dureté HB et l'essai de traction ……63
3.2.1.2 Procès-verbal d'essai ……63
3.2.2 Essai Vickers ……..64
3.2.2.1 Procès-verbal d'essai ……65
3.2.3 Essai Rockwell……66
3.2.3.1 Procès-verbal d'essai ……66
3.2.4 Essai CNOOP……...67
3.2.5 Tableau de comparaison ……68
3.3 Essai au choc ……68
3.3.1 Éprouvette ……69
3.3.2 Machine ……69
3.3.3 Essai……70
3.4 Essai de pliage ……...……70
3.4.1 Éprouvette ……...……71
3.4.2 Procès-verbal……...……71
3.5 Essai d'emboutissage ……71
3.5.1 Essai Erichsen ……..……..72
3.5.2 Essai Persoz……72
3.5.3 Procès-verbal……...……72
3.5.4 Emploi ……72
3.6 Essai de fatigue ……72
3.6.1 Essai de fatigue par flexion relative ……73
3.6.2 Courbe Wöhler……..74
3.6.3 Résultats obtenus ……74
3.7 Essai de fluage ……74

3.7.1 Procès-verbal……...……75
3.8 Essai de aux rayons X……..75
3.8.1 Emplois ……77
3.9 Gammagraphie ……..77
3.9.1 Même emploi que le rayon X ……78
3.10 Ultra-Sons ……78
3.10.1 ondes sonores ……78
3.10.2 L'effet <<piézo-électrique>> ……...……..80
3.10.3 Différent méthode de contrôle des pièces ……..80
3.10.4 Utilisation ……..…82
3.10.5 Chois de la fréquence ……82
3.11 Fluorescence ……82
3.11.1 emploi ……83
3.12 Macrographie ……83
3.12.1 Polissage ……84
3.12.2 Attaque lente ……..84
3.12.3 Attaque rapide ……84
3.12.4 Attaque par impression……85
3.12.5 procès-verbal……85
3.13 Micrographie ……85
3.13.1 polissage ……...……..86
Chapitre IV : Théorie élémentaire des alliages
4.1 Structure cristalline ……110
4.1.1 Les atomes……...……..110
4.1.2 La maille……110
4.1.3 Le cristal……110
4.1.4 Les dendrites ……..110
4.1.5 Les grains ……..111
4.2 Fusion et solidification d'un métal pur ……111
4.2.1 Transformation allotropique……..112
4.3 Fusion et solidification des alliages ……..……113
4.3.1 Alliage donnant une solution solide ……..……113

4.3.2 Alliage donnant lieu à la formation d'un mélange électrique ……114

4.3.2.1 point eutectique ……..114

4.3.2.2 alliage inférieur ou supérieure a eutectique ……114

4.4 Diagramme fer-carbone …… ……115

4.4.1 Etude du diagramme ……115

Chapitre V : traitement thermique

5 Généralité ……123

5.1 La trempe (théorie)……...123

5.1 La trempe (pratique)……126

5.2 Revenu (théorie)……..…….…… .131

5.2 Revenu (pratique)……..…… .132

5.3 Le traitement thermique de l'acier rapide ……..……133

5.3.1 Trempe……134

5.3.2 Revenu……134

5.3.3 Nitruration ……..135

5.4 Les recuit ……..……136

5.4.1 Recuit de normalisation N……..136

5.4.2 Recuit doux G ……36

5.4.3 Recuit de stabilisation ou recuit intermédiaire……..……137

5.5 Les durcissement de la surface ……138

5.5.1 Cimentation ……..……138

5.5.1.1 Cimentation solide A……...141

5.5.1.2 Cimentation liquide B ……141

5.5.1.3 Cimentation gazeuse C ……...……142

5.5.1.4 Cimentation Rapide ……...…….142

5.5.2 Nitruration ……143

5.6 Essai de trempabilité ((jominy))……...……..147

Chapitre VI : Propriété Des Aciers Et Emploi

Chapitre VII : recuit d'information sur l'acier X20Cr13

7.1 Introduction ……..170

7.2 Historique ……..170

7.3 Diminution d'un acier inoxydable……..……171

7.4 Diagramme d'équilibre…….171

7.5 fer-chrome …….171

7.6 Digramme d'équilibre Fe-C-Cr ……171

7.7 Classes de structure des aciers inox dans le système Fe-C –Cr……..171

7.8 Acier inoxydables ferritiques……..……172

7.9 Acier inoxydables martensitiques…….....…….172

7.10 Acier inoxydables austénitiques……..……172

7.11 Acier inoxydables austéno-ferritiques…….……173

7.12 Structure à l'état recuit ……173

7.13 Introduction ……173

7.14 Chauffage des aciers inoxydables……173

7.15 Condition de chauffage des pièces en traitement thermique……173

7.16 Refroidissement des aciers inoxydable…….173

7.17 Digramme T.T.T (température –transformation – temps)X20Cr13…….……174

7.18 Transformation martensitique ……..174

7.19 trempe des aciers inoxydables …… 174

7.19.1 principe de la trempe ……174

7.20 Description de la Transformation martensitique……174

7.20.1 Caractéristique générale …….……174

7.20.2 Austénites résiduelles après trempe……..174

7.20.3 La composition chimique ……175

7.21 Structure du revenu……175

7.21.1 Introduction ……175

7.21.2 Traitement de revenu ……..175

Chapitre VIII : résultats expérimentaux industriels

8.1 Introduction ……176

8.2 Dureté ……176

8.3 Essai de traction ……...176

8.4 Microstructure……..176

8.5 Polissage ……..176

8.6 Attaque chimique ……176

8.7 Analyse de l'acier X20Cr13……..177

8.7.1 Introduction ……..……..177

8.8 Caractéristique de l'acier X20Cr13……..…177

8.9 Composition et structure des aciers inoxydable……..……..177

8.10 Domaines d'utilisation …….177

8.11 Particularités ……...…….177

8.12 Désignation……..……178

8.13 Composition chimique ……178

8.14 Caractéristique mécanique ……..178

Conclusion générale

Référence bibliographique

Anexe01 et anexe02

Introduction :

Le choix d'un matériau pour une application donnée nécessite s'assurer sa durabilité dans ses conditions d'emploi, en particulier environnementales, ceci est particulièrement vair pour le système destiné à travailler à des températures élevées et dans des atmosphères corrosives, pour cela, la connaissance et la compréhension du phénomène d'oxydation est indispensable afin de prévoir la durée de vie des structures de proposer des solution de protection adaptées, l'étude de l'oxydation à haut température est par conséquent un sujet fortement interdisciplinaire à l'interface de la physico-chimie des matériaux métalliques. L'intérêt des aciers allie réside dans leurs nombreuses caractéristiques de résistance mécanique (dureté, résilience, à la déformation). Un avantage majeur de ces aciers est leur résistance à la corrosion et à l'oxydation à chaud, due à la présence en surface d'une couche protectrice, constituée majoritairement d'oxyde et d'hydroxydes de fer et de chrome leur cout d'élaboration reste relativement modéré, du fait l'abondance naturelle du minerai de fer.

En fin , ces acier sont pratiquement entièrement recyclables .touts ces caractéristiques font de l'acier allie un matériau de prédilection pour de multiples application aussi bien pour l' usage courant que pour les technologie de points particulièrement dans les équipements ménage la coutellerie ,l'horlogerie ,les industries automobiles ,papetières ,chimiques, pharmas tiqués, pétrolières, argo- alimentaires, équipements maritimes, nucléaires ,aéronautiques ...etc.

Parmi les nombreuses nuances d'aciers faiblement allie, l'acier martensitiques 42CD4 (**AISI-SAE4140**) est plus fréquemment utilisé.

Notre travaille s'inscrit dans la recherche de l'amélioration des caractéristique mécanique par l'obtention sur des traitements thermique.

La résistance à l'oxydation par la modification de la composition superficielles à fait l'objet plusieurs recherches, notre travail s'inscrit dans cette problématique, qui consiste à optimisions les traitements thermique trempe et revenu pour meilleur caractéristique mécanique.

Ce travail comporte deux parties principales, le primaire présente une synthèse bibliographique partagé en six chapitres.

Le premier englobe Les divers états de la matière, le deuxième sur le

Introduction

Le haut fourneau .le troisième étude des principaux essais .le quater aime Structure cristalline.

Le cinquième et sixième traitement thermique et étude les aciers faiblement allie (42CD4).

Enfin la deuxième partie regroupe les résulta expérimentaux et leurs interprètation.ce travail est terminé par une conclusion général.

1.1 Les divers états de la matière :

Rappel : la matière, dans la nature, se présente sous les trois états physiques suivants :

1-solide

2- liquide

3-gazeux

1.1.1 Caractéristiques des solides :

Rigidité, élasticité, incompressibilité, forme propre.

1.1.2 Caractéristiques des liquides :

Surface libre apparente, incompressibilité, élasticité, sans forme propre,

1.1.3 Caractéristiques des gazeux :

Sans surface libre, grande compressibilité, expansibilité, élasticité. La plupart des corps peuvent aisément changer d'état, sous l'action de la chaleur, de la compression, etc.

1.2 Constitution de la matière :

La matière est constituée de particules très petites appelées molécules, dont l'ordre de grandeur est de1 Å (10^{-8}cm).par exemple, 1cm^3 d'eau(H_2O) contient $33*10^{21}$ molécules.

Pour les solides, les molécules, très rapprochées, se maintiennent en place par des forces d'attraction et de cohésion .Une disposition géométrique régulière des molécules l'ensemble de la masse caractérise un état cristallin.

Dans le cas contraire, une disposition irrégulière des molécules dans la masse caractérise un état amorphe.

Un corps cristallisé est anisotrope, c'est-à-dire que ses propriétés varient suivant la direction qui sert à les évaluer.

Un liquide peut être obtenu, par exemple, à partir d'un solide, par la diminution des forces d'attraction ou de cohésion.

Un corps gazeux est obtenu à partir d'un solide ou d'un liquide par la suppression de la quasi –totalité des forces déjà citées.

Un même corps peut se présenter (suivant les conditions) sous l'un des trois états : solide, liquide, gazeux.

Par voie chimique, il est possible de décomposer la molécule jusqu'à son plus petit élément : l'atome.

On a identifie 92 éléments dits naturels, c'est-à-dire se trouvant dans la nature.

(La physique nucléaire a créé plus d'une dizaine d'autres éléments.)

Ces 92 éléments se répartissent en deux grands groupes, les métaux et les métalloïdes.

L'atome est formé d'un noyau positif et de satellites négatifs appelés électrons, répartis en plusieurs couches concentriques autour du noyau K ,L,M,N,O,P,Q, définissant des niveaux décroissants d'énergie .

Le noyau est composé de deux sortes de particules :les protons positifs et les neutrons de masse semblable, mais électriquement neutres. Ces dernières particules équilibrent les forces de répulsion des protons (+et+ se repoussent).

Le noyau est donc caractérisé par deux constantes :

1-le nombre de protons Z :

qui détermine le numéro atomique, il varie de 1(l'hydrogène) à92 (l'uranium),Ce nombre indique également la charge et le nombre d'électron planétaire .

2-le nombre de masse A :

Indique la somme des particules protons+ neutrons, il correspond sensiblement à la masse atomique.

Les caractéristiques d'un élément sont symbolisées de la façon suivante :

Z

Symbole

A

Exemple :

$_{238}{}^{92}\mathbf{U}$

Le noyau d'uranium est composé de 238 particules dont 92 protons et (238-92)=146 neutrons.

Les propriétés chimiques des atomes sont fonction de la dernière couche d'électrons (dite couche périphérique).

Les métaux sont des éléments électropositifs, c'est-à dire qu'ils libèrent facilement les électrons de la couche périphérique ; par contre, **Les métalloïdes sont électronégatifs**, c'est-à dire qu'ils ont tendance à compléter leur dernière couche périphérique.

Le nombre d'électrons cédé par les métaux, ou le nombre d'électrons absorbe par métalloïdes, définissent le nombre de liaisons ou valences ; on dit qu'ils sont mono, bi, ti,….. lorsqu'ils ont 1.2.3…. valences.

Les atomes possédant leur couche périphérique complète sont à l'état naturel des gaz rares ou inertes, donc très stables ; cette stabilité est permanente lorsque l'atome contient 8 électrons sur la dernière couche (2 pour l'hélium).

Les liaisons entre atomes, pour la formation de molécules, peuvent intervenir :

a) Par l'abandon d'électrons, d'un atome au bénéfice d'un autre (métal à métalloïde)
b) Par la mise en commun d'électrons périphériques pour compléter leur dernière couche (métalloïde à métalloïde).c'est une liaison par covalence, stable et très fréquente dans les matières plastiques.

Si les atomes se lient entre eux par valence, ou covalence, les molécules s'attirent entre elles, le plus fréquemment par des forces de cohésion polaires, dues à une répartition inégale des charges positives et négatives dans la molécule.

Cette polarité intervient lorsque des électrons subissent une attraction plus forte de certains atomes (très courante dans les matières plastiques).Les forces de cohésion déterminent les propriétés physiques et chimiques des matériaux, elles peuvent être influencées par des variations de température, de pression, des champs électriques ou magnétiques, des contraintes mécaniques, etc.

1.3 Introduction aux minerais :

La plupart des minerais sont constitués par de la substance minéral (ou corps minéralisé) entourée et mélangée à de la gangue (substance stérile) éliminée par voie physique ou par voie chimique.

D'ordinaire, le corps minéralisé ne contient pas le métal à l'état pur ; celui-ci est combiné chimiquement à d'autres éléments, tels que O, C, S, P, et contient de plus de l'eau d'hydratation.

Dans ce cas, l'eau d'hydratation est éliminée à haute température, le minerai poreux ainsi obtenu est fractionné par voie physique ou dissocié par voie chimique ou électrolytique en métal pur et métalloïde. **(FIGURE : 1.1)**

2.1. Le haut fourneau

➢ Principe de la sidérurgie :

Le minerai à traiter, comprenant de l'oxyde de fer (fer + oxygène) et de la gangue, il faut pour obtenir le métal :

1° libérer le fer : en faisant agir un corps susceptible de se combiner avec l'oxygène de l'oxyde.

Un tel corps est appelé réducteur. Pratiquement, c'est le carbone qui est utilisé.

Pour que cette réduction soit possible, il est nécessaire de fournir de la chaleur. Aussi fait-on brûler un excès de carbone.

2° Séparer le fer de la masse : par fusion du métal qui coule et se rassemble à la partie inférieure du four. La chaleur nécessaire à ce changement d'état est fournie par la combustion du carbone.

3° Eliminer la gangue : On ajoute pour cela un fondant (pierre à chaux ou à magnésie) qui donne avec la gangue un verre grossier : le laitier. Plus fusible et plus léger que le fer, ce laitier coule et se rassemble au-dessus du métal liquide. On peut alors l'évacuer à l'extérieur du four par décantation. (FIGURE **: 2.2)**

Le laitier est utilisé à diverses fins, en particulier :

- moellons pour les digues
- ballast de voies ferrées
- briques
- laine de laitier en qualité d'isolant phonique et thermique

➢ HAUT FOURNEAU

(Caractéristiques) :

Les hauts fourneaux modernes sont des appareils d'une trentaine de mètres de hauteur, constitués principalement de deux troncs de cônes accolés par le bas :

1° Le tronc inférieur ou «étalages» se prolongeant par partie cylindrique de 8 m, et plus de diamètre appelée «creuset», dans lequel s'accumulent les produits du travail : La fonte et le laitier

Par les «tuyères», tuyaux coniques placés en haut du «creuset», on insuffle un énorme volume d'air chaud (800 à 1200°C) destiné à provoquer la combustion du coke.

2° Le tronc supérieur ou «cuve» se terminant par un orifice appelé «gueulard».

C'est par le gueulard, orifice à double fermeture, que sont introduites en couches alternées les matières premières, les charges, qui sont transportées à sa hauteur dans des bennes par un monte-charge verticale ou une sorte de funiculaire, le «skip» de chargement.

L'utilisation de courroies transporteuses est de plus en plus fréquente.

➢ NOUVEAUX PROCÉDÉS

Parmi les perfectionnements il faut citer les techniques d'injection de vapeur d'eau et d'hydrocarbures :

a) gaz naturel (méthane)
b) huiles minérales (fuels légers et lourds).

Ces fluides sont introduits avec le vent chaud par les tuyères à l'aide d'un appareillage qui assure la pression et le débit désirés.

L'injection d'hydrocarbures exige une augmentation de la température du vent et de la consommation de gaz des «cowpers».

Elles permettent en contrepartie d'économiser 10 à 20% du coke et d'accroître la production journalière de fonte, tout en régularisant et améliorant sa composition.

➢ PRODUIT DU HAUT FOURNEAU :

❖ La fonte :

Lorsque le creuset est plein et que les laitiers ont été évacués, on procède à la coulée de la fonte :

On débouche le trou de coulée.

Comme le haut fourneau fonctionne d'une façon continue, on procède à plusieurs coulées par jour.

On peut obtenir ainsi plus de 2000 tonnes de fonte par24 heures

destinées à :

- la coulée des gueuses : destinées à être utilisées dans les fonderies de deuxième fusion **(FIGURE 2.3)**
- l'exécution de grosses : pièces par coulée directe dans des moules
- la fabrication de l'acier : La fonte est alors coulée dans de grands récipients appelés mélangeurs. Cet appareil, qui comporte un dispositif de chauffage au gaz, vise trois objectifs :

  1° Il permet une régularisation de la qualité de la fonte, puisqu'il rçoit plusieurs coulées successives

  2° Il joue le rôle régulateur dans l'exploitation

  3° Enfin, par son stockage durant plusieurs heures, la font ainsi entreposée subit un véritable affinage qui en améliore ses qualités .

USINOR DUNKERQUE	**Exemple d'installation**	
Nature	caractéristiques	
Haut fourneau N°1	ø du creuset 8,50m	volume utile 1285 m^3
Haut fourneau N° 2	ø du creuset 8,70m	volume utile 1350 m^3

Chargement par bandes porteuses au débit de 700 m^3 /h soit :

Agglomeré et minerai ……2000 t/h
Coke ……..….350t/h

Ils peuvent atteindre une production d'environ 5500t/jour de font, avec une charge composée de minerais riches non phosphoreux.

➢ HAUT FOURNEAU

❖ (Fonctionnement) :

Ce sont des appareils qui fonctionnent en marche continue, et qui sont le siège d'**un double mouvement** :

Marche ascendante des gaz, par opposition à la marche descendante des solides.

1° **Le mouvement de descente des solides,** constitué par **les charges,** introduites par le «gueulard».

Le charge sont constituées par :

a) Le minerai à l'état d'oxyde, concassé et aggloméré.
b) Le coke métallurgique qui doit avoir une bonne résistance à l'écrasement et une excellente porosité pour laisser passer le courant gazeux.
c) Le fondant est un produit d'addition qui permet la séparation du métal de la gangue, à une température relativement basse. La nature du fondant dépend donc de la nature de la gangue.

De la castine si la gangue est alumineuse.

De l'argile (erbue) si la gangue est calcaire.

2° **le mouvement de montée des gaz,** des tuyères au gueulard.Ces deux mouvements forment les zones suivantes :

-**La dessiccation,** entre 300 et 350° C. Période pendant laquelle la vapeur d'eau contenue dans les éléments des charges s'évapore. C'est une **déshydratation.**

- La réduction, entre 350 et 750°C, du minerai (oxyde de fer) est obtenue non par le charbon, mais par l'oxyde de carbone.

Le contact entre le minerai et le charbon serait trop grossier pour obtenir un bon rendement, le contact du minerai avec un gaz est bien meilleur.

L'oxyde de fer perd son oxygène.

-La carburation, entre 750 et 1150° C. A la température élevée qui règne dans les «étalages», le fer se combine partiellement au carbone ; c'est pourquoi on n'obtient pas du fer pur, mais de **la fonte,** produit renfermant de 2,5 à 5% de carbone et d'autres éléments en petite quantité (manganèse, phosphore, silicium).

-La fusion, entre 1150 et 1800° C. Passage du fer carburé (fonte) de l'état solide à l'état liquide.

-La liquation. La température est voisine de 1600° C. Le métal liquide (fonte) coule dans le fond du creuset ; sur le métal surnage **le laitier,** la séparation se faisant par différence de densité.

Le laitier constitue un écran de protection à l'air des tuyères, pour empêcher la fonte de s'oxyder. **(Figure : 2.4)**

- **HAUT FOURNEAU :**
- **Les fontes**

La fonte produite par le haut fourneau est appelée : **fonte de première fusion.**

a)FONTE BLANCHE :

Dans la fonte blanche, tout le carbone est combiné au fer pour donner du carbure de fer (cémentite), corps très dur, très fragile, dont la couleur est gris clair avec éclat métallique. Aussi la cassure de la fonte est-elle **blanche,** compacte, sans trace de graphite. Cette fonte est très dure. Elle ne s'usine pratiquement pas ou difficilement.

Elle est utilisée comme fonte d'affinage pour la fabrication de l'acier.

Elle est obtenue en haut fourneau marchant à allure froide (moins de coke et vent moins chaud que pour l'obtention de la fonte grise).

La composition moyenne présente les valeurs suivantes :

C=2.3 à 3%; p=2% ; Mn=1.5%;

Si= 0.6% ; Fe reste.

Masse volumique : 7.4Kg/dm^3

Point de fusion : 1200° C.

b) FONTE GRISE

Dans la fonte grise, presque tout le carbone se trouve à l'état libre sous forme de graphite. Ce sont les petites paillettes noires de graphite. mélangées aux cristaux de fer, qui donnent à la cassure de la fonte une teinte grise. La présence du silicium a favorise la précipitation du carbone sous forme de graphite.Cette fonte sert à faire des gueuses pour les fonderies de deuxième fusion et moulage de grosses pièces.

La composition moyenne présente les valeurs suivantes :

C = 3 à 4.5 %; Si =1.5 à 5 %; Mn = 1 %;

P = 0.08% ; S = 0,054.

Masse volumique : 7.4kg/dm^3.

Point de fusion : vers 1200° C.

MINERAI DE FER

(5**%** de l'écorce terrestre environ)

Généralités

La nature ne nous fournit pas à l'état pur (à part les petites quantités de fer météorique), mais sous forme **de combinaisons chimique** de métaux agglomérés à des roches ou de la terre : cet agglomérés s'appelle «gangue» composé de silice, alumine, chaux, magnésie.Tout l'ensemble porte le nom de minerai.

La valeur marchande du minerai dépende de la teneur en fer contenu dans le minerai, désignée en pour-cent (au minimum 28 **%**) et de la composition chimique du minerai :

a) avec de **l'oxygène** pour former **des oxydes.**

1° **La magnétite** Fe_3O_4 .Minerai très riche, 60 à 65**%** de fer. Ce minerai donne des aciers d'excellente qualité. On le trouve en suède, Espagne, Algérie, Etats-Unis, Russie.

2° **L'hématite rouge,** Fe_2O_3.

Couleur rouge vif, c'est le plus pur et le plus recherché de tous les minerais de fer.

Une bonne hématite contient 60 à 68**%** de fer, le reste est l'oxygène et il ne s'y trouve que peu d'impuretés. On la trouve en France, Algérie, Angleterre, Allemagne, Etats-Unis.

En suisse, le gisement de Gonzen, prée de Sargans, contient environ un million de tonne d'hématite rouge à 50% de fer.

3° **Le fer oolithique** Des gisements très abondants se trouvent en Lorraine où cette variété est appelée « minette » ; ce minerai présente l'inconvénient d'être riche en phosphore mais la découverte du procédé Thomas et Gilchrist pour la déphosphoration des aciers a permis au bassin lorrain de connaître un grand essor.

b) avec l'acide carbonique pour former des carbonates.

1° **La sidérose** ou **fer spathique** $FeCO_3$**.**

Il est d'une réduction facile, après avoir subi une calcination.Pauvre en phosphore et très recherché pour sa teneur en manganèse.

c) avec le soufre pour former des **sulfures.**

1° **La pyrite de fer,** Fe S_2.

Peu utilisé suite des difficultés d'éliminer complètement le **soufre,** par grillage

❖ **LE COKE :**

Le coke joue, dans l'élaboration de la fonte, un double rôle : celui de combustible et celui de **réducteur.**

Un réducteur est un corps qui peut s'emparer de l'oxygène combiné à d'autres éléments.

Le coke provient de la distillation, en vase clos, de charbon ayant des caractéristiques particulières.

Les charbons doivent contenir très peu d'impuretés car celles-ci formées en majeure partie de **soufre** et de **phosphore** passeraient tout entières dans la fonte.

❖ **CARBONE :**

Symbole C de masse atomique 12

Généralités :

C'est un métalloïde solide très résistant à la chaleur, et que ni les gaz ni les solides ne peuvent attaquer. Il se volatilise vers 3500°C.

Le carbone est insoluble dans les liquides, à l'exception de quelques métaux en fusion, le **fer** en particulier. Les atomes de carbone ont la propriété remarquable de pouvoir s'attacher les uns aux autres jusqu'à former de très longues chaînes.

Le carbone existe dans la nature à l'état pur sous deux formes différentes :

a)Le diamant (fig. 2-5). Il est formé de cristaux parfois transparents, appartenant au système dit cubique.

On l'extrait des mines d'Afrique du Sud, du Brésil, de l'Australie ou de l'Inde.

C'est le plus dur de tous les corps connus.

Dureté Mohs 10

Masse volumique . . 3 à 3,5Kg /dm^3

Isolant électrique excellent.

Les applications commerciales et industrielles du diamant sont : fabrication des trépans destinés à perforer les roches très dures lors de la recherche du pétrole, diamant des vitriers, burins…

a)Le graphite. C'est un corps noirâtre, tendre, au touché onctueux, formé de cristaux à base hexagonale. On le trouve à Madagascar, au canada, en bohême.

Masse volumique : 2,2kg /dm^3 .

Très bon conducteur du courant électrique.

Les applications commerciales et industrielles du graphite sont : fabrication des électrodes, fabrication des « mines » de nos crayons…

Les combinaisons du carbone sont extrêmement nombreuses : carbure d'hydrogène, alcool, sucre, graisse, albumine, cellulose.

Elles entrent pour une part importante dans la constitution des organismes animaux et végétaux (homme 17% C).

b) **Les charbons.** Ils contiennent une quantité plus ou moins abondante de carbone associé à des impuretés diverses, ils proviennent de la décomposition de la matière végétale enfouie à des périodes géologiques anciennes. On extrait principalement :

L'anthracite (90 à 95% de C)
- La houille (75 à 90% de C)
- Le lignite (50 à 70% de C)
- La tourbe (20 à 40% de C)

2.2. Fours électriques à fonte « TYSLAND HOLE » **(FIGURE : 2. 6)**

❖ **Principe :** four à réduction électrique à cuve basse du système norvégien « TYSLAND HOLE ».

Dans le four électrique, le charbon est utilisé exclusivement pour la réduction du minerai et pour la carburation du fer, ce qui représenté environ les deux cinquièmes de la quantité de charbon utilisé dans les hauts fourneaux à coke, les trois cinquièmes restant sont remplacés par l'énergie électrique qui produit la chaleur nécessaire à la fusion.

Dans le haut fourneau, la combustion du charbon est possible grâce à l'introduction du vent des souffleries.

Dans le four électrique, avec la suppression des charbons de combustion, **les vents sont également supprimés.**

Caractéristiques :

Comme l'indique le nom de l'appareil, on voit qu'il s'agit d'un four de hauteur réduite et qui se rapproche même plus d'un four à sole que d'un four à cuve.

Les diamètres des appareils sont, par contre, relativement grands. Pour des fours de 200 à 250 tonnes de fonte par jour, on obtient, en effet, un diamètre de l'ordre de 12 m.

Le chargement est généralement réalisé par bennes qui déversent leurs contenus dans des trémies, ces dernières alimentent directement de nombreux points de chargement aménagés dans la voûte du four.

Les électrodes sont au nombre de trois, disposées en triangle. Sur les grands fours, les électrodes atteignent des dimensions impressionnantes de l'ordre de 1,80 m de diamètre la régulation de la hauteur de l'électrode dans la charge peut être faite manuellement ou de façon automatique.

❖ **Matières :**

Dans le haut fourneau au coke, il était de prime importance que le coke introduit dans le four soit fabriqué spécialement avec une bonne résistance à l'écrasement et une excellente porosité pour laisser passer le courant gazeux ascendant, conditions qui ne sont plus du tout nécessaires dans le four électrique.

Les minerais peuvent être aussi plus fins.

Pour un meilleur rendement, La charge doit être préparée par agglomération. Bien que la production de fonte actuelle dans les fours électriques atteigne à ce jour au maximum 1% de la production mondiale, **ce système de fusion est considéré comme étant la méthode moderne.**

Les pays : Brésil – Israël – Italie – Espagne – Canada – Pérou – Suisse –Suède – Norvège - Venezuela – Russie – Japon – Yougoslavie, etc…

L'usine de Choindez de von Roll SA

La Société des usines de von Roll SA, de Choindez, possède un four électrique à cuve basse du type « TYSLAND HOLE ». **(FIGURE : 2.6)**

Caractéristiques

Cette entreprise utilise 200 tonnes de matières premières par jour.

Soit :

1° Du minerai de Fricktal à 28-29% de fer. Des cendres de pyrite, sous-produit des usines d'acide sulfurique, 60%de fer.

2° Du coke des usines à gaz suisses mélangé à des anthracites français à forte teneur en cendre.

3° Un fondant, du calcaire.

La production journalière du four à cuve basse est de **80tonnes de fonte brute,** qui a la composition suivante : 3,5 à 4% de carbone, 2% de silicium, 0,3% de manganèse, 0,7% de phosphore et moins de 0,05%de soufre. Cette fonte est directement utilisée pour les trois quarts dans la fonderie de Choindez, pour la fabrication des tuyaux.

Les 45 tonnes de scories sont reprises par l'industrie du ciment.

Le gaz est utilisé comme source de chaleur dans les fours à recuire les fontes et les fours à sécher.

2.3. Transformation fonte-acier :

- **ELABORATION DE L'ACIER :**

Classification des métaux ferreux :

1° Fontes.

Fer + 2,5 à 6,67% de C.

2°Aciers sauvages (peu utilisés en raison de leurs grandes fragilités).

Fer + 1,7 à 2,5% de C.

3°Aciers.

Fer + 0,05 à 1,7% de C.

4°Fer pur ou fer de Suède.

Fer + trace de C.

Affinage :

Pour transformer **La fonte** en **acier**, il faudra donc enlever en partie le carbone, le silicium, le manganèse et en totalité le phosphore et les impuretés.

- **Affinage ACIDE** : fonte de première fusion obtenue par un minerai riche en Si (2%) et pauvre en P (0,07) (minerais américains).
- **Affinage BASIQUE** : fonte de première fusion obtenue par un minerai riche en P (2%) et pauvre en Si (0,5) (minerais européens).

Quelle que soit la nature du procédé utilisé :

Conversion de la fonte ou affinage sur sole : la fabrication de l'acier comporte une phase fondamentale d'élimination des impuretés d'un bain liquide.

Le résultat sera obtenu par l'action de **l'oxygène pur**, soit **l'oxygène** contenu dans l'air, ou **l'oxygène** contenu dans les oxydes de fer des minerais ou des riblons qui brûlera les corps en excès (oxydation), donnant ainsi des **produits volatils**, évacués dans les fumées, ou des **produits solides**, évacués sous forme de laitiers liquides grâce à l'action d'un fondant : la chaux.

Le soufre ne fait pas partie de l'affinage, il a été éliminé en grande partie dans le haut fourneau.

Le séjour de la fonte dans le mélangeur fait baisser encore la teneur en S.

Quel que soit le procédé employé pour l'affinage, le garnissage des fours sera :

1° Briques réfractaires silicieuses (affinage acide).

2° Briques réfractaires chaux et magnésie (affinage basique) inattaquable à la chaux que l'on doit introduire pour éliminer le phosphore de la fonte.

2.4. Acier Thomas

Convertisseur (FIGURE : 2.7)

- **Principe :** oxydation du C de la fonte par **l'oxygène de l'air.** Ce procédé tend à disparaître, remplacé par **l'oxygène pur.**

Four : le convertisseur est une cornue en tôle avec revêtement intérieur en briques réfractaires.

Sous la partie inférieure, percée de trous (100-200 de 10 mm de diamètre), est placée une boîte à vent dans laquelle on fait arriver de l'air froid sous pression qui traverse et brasse la coulée du métal en fusion.

Le four peut basculer autour d'un axe de rotation pour permettre son remplissage et la coulée du métal.

Les grandeurs peuvent atteindre 8,50 m de hauteur et 5 m de diamètre pour contenir environ 70 tonnes de fonte.

- **Conduite des opérations :**

1° La cornue étant inclinée, on charge de la fonte liquide phosphoreuse.

2° On donne du vent et on redresse l'appareil, L'air soufflé traversant lamasse de fonte en fusion élimine par combustion :

a) Etincelles, combustion du silicium, 2 à 3 min.
b) Période des flammes bleues, combustion du carbone, 10 à 12 min.
c) Période des fumées ou sursoufflage, combustion du phosphore, 3 à 4 min.
d) Enfin, des fumées rousses apparaissent ; elles annoncent le début de l'oxydation du fer.

Le contrôle de l'opération se fait par l'aspect de la flamme observée à l'œil, au spectrographe ou également par cellule photo-électrique.

On prélève un échantillon de métal dans une petite lingotière. L'éprouvette est forgée, trempée, pliée à bloc et ne doit pas former de criques.

3° La période de décrassage correspond à l'enlèvement de la scorie abondante (25% environ de la quantité du métal) qui surnage l'acier.

Les scories broyées sont livrées à l'agriculture. Elles contiennent 15 à 25% d'anhydride phosphorique.

4° **Addition finale.** Dans la cornue, il n'ya donc plus que du fer et un peu d'oxyde de fer. Pour transformer le métal en acier, il faut donc :

a) Ajouter du carbone.
b) Réduire l'oxyde de fer.

Aussi ajoute-t-on une fonte spéciale (ferromanganèse) qui contient le carbone, 6-10%, indispensable à la transformation du fer en acier. Ensuite le manganèse, 70-80%, plus avide d'oxygène que le fer, réduit l'oxyde de fer déjà formé et le transforme en fer.

5° **coulée de l'acier.** L'opération complète est très rapide ; elle dure environ vingt minutes.

La chaleur nécessaire pour maintenir la masse en fusion est poussée par la combustion des **éléments thermogènes Si Mn et C.**

Acier thomas :

L'acier Thomas comporte trois éléments indésirables :

Le soufre et le phosphore provenant de la fonte, l'azote provenant de l'air soufflé.

- **Le soufre augmente la fragilité à chaud.**
- **Le phosphore augmente la fragilité à froid.**
- **L'azote provoque le vieillissement et les inclusions de nitrures.**

2.5. Acier à l'oxygène :

Aciers à l'oxygène pur :

Les progrès réalisés dans la fabrication de l'oxygène en grande quantité à un prix de revient peu élevé ont permis d'envisager **en sidérurgie l'utilisation d'oxygène pur à la place de l'air.**

Convertisseurs (FIGURE : 2.8)

LD : (Linz-Donawitz).

OLP : (Oxygène – lance – Poussière).

Principe

Oxydation du C de la fonte per **l'oxygène pur.**

Four :

Les convertisseurs LD et OLP sont semblables aux Bessemer et Thomas dont le fond serait plein.

La hauteur peut atteindre 9,90 m et le diamètre intérieur du corps cylindrique en tôle, 7,30m.

Volume intérieur environ : 150 m^3.

Garnissage permanent : briques en dolomie.

Garnissage d'usure : briques en dolomie goudronnée.

La lance verticale, refroidie par circulation d'eau, pénètre par le bec et souffle de l'oxygène à une certaine distance du bain.

Capacité :

180 tonnes d'acier liquide, procédé LD 150 tonnes d'acier liquide, procédé OLP.

❖ **Conduite des opérations :**

1° La cornue étant inclinée, on charge de **la ferraille** (riblon) 30 à 45%, l'on déverse **la fonte** provenant du mélangeur.

2° Le four est ensuite redressé et l'on installe la lance en même temps que commence le soufflage de l'oxygène. Pour le convertisseur LD, les composants du laitier, chaux et fondant, sont amenés par une goulotte.

Pour le convertisseur OLP, un réglage précis de la mise en suspension de la poudre de chaux dans le courant d'oxygène supprime l'addition de produits quelconques pour constituer le laitier.

3° En observant l'image de la flamme, courte d'abord, s'allongeant ensuite pour redevenir petite, on peut déterminer avec précision la fin de l'opération.

4° Eprouvette.

5° Décrassage et coulée de l'acier avec les additions finales C, Mn, Si.

Convertisseur KALDO (FIGURE : 2.9)

Principe :

Oxydation du C par l'oxygène pur.

Il permet en outre **la combustion dans le four de l'oxyde de carbone** dégagé et l'utilisation métallurgique des calories ainsi produites en fondant jusqu'à 99% de ferraille (riblon).

Four :

Le four est en position inclinée et tourne sur lui-même à raison de 30 tours par minute. Cette rotation favorise les échanges entre le métal et les scories.

Le tout est monté sur un berceau de rotation, ce qui permet le chargement et la coulée.

Revêtement basique.

La lance refroidie par circulation d'eau est inclinée à 17°.

Conduite des opérations

1° avec environ 3 tonnes de laitier partiellement solidifié de la coulée précédente, on charge environ 80 tonnes de fonte en fusion.

2° La moitié des ferrailles nécessaires, 30 tonnes est chargée à son tour + 7 tonne de chaux.

3° Le four est alors soufflé pour réchauffer l'ensemble.

4° La seconde moitié des ferrailles, 30tonnes, est introduite.

5° Le soufflage continue.

6° prise de l'éprouvette et premier décrassage si l'analyse est bonne.

7° Addition de 1,5 tonne de chaux, le soufflage reprend jusqu'à ce qu' on obtienne l'analyse voulue.

8° Deuxième décrassage, le laitier est séché par procédé spécial et servira dans la coulée suivante.

9° Coulée de l'acier après les additions nécessitées par l'analyse finale recherchée.

La moyenne des poids de coulée varie de 120 à 125 tonnes d'acier.

Acier à oxygène :

L'acier obtenu ne contient pratiquement pas d'azote dissous, **il est très pur en** soufre et en phosphore.

Ses qualités permettent de l'utiliser dans les domaines jusqu'ici réservés à l'acier « Martin »

2.6. Aciers Martin :

- **Four MARTIN (FIGURE : 2.10) :**

Principe :

1°Fusion des aciers de récupération et modification du pourcentage de carbone **par addition soit de la fonte pour l'augmenter, soit de l'oxyde de fer pour le diminuer.** (Principe de dilution.)

2° Oxydation du carbone de la fonte par **l'oxygène de l'oxyde de fer** (minerais).

3° Le principe le plus courant emploie à la fois **la dilution et l'oxydation.** Dans les trois cas on ajoute de la chaux qui facilite la formation de laitiers fusibles et l'évacuation des impuretés.

Four :

Le four Martin proprement dit comprend :

a) **La sole :** sorte de cuvette rectangulaire, légèrement creuse, dont le fond est incliné vers le trou de coulée La construction, faite de briques réfractaires en silice ou en dolomie, est montée sur poutrelles pour permettre le refroidissement de la surface inférieure.

b) **Le laboratoire :** espace compris entre la sole et la voûte. Des portes placées sur la face avant du four permettent le chargement. L'une d'elles est disposée pour permettre l'évacuation des scories et le décrassage du four.

c) **La voûte :** du type suspendu, légèrement convexe, constituée par des briques en chrome-magnésie armées intérieurement et munies de languettes de suspension.

d) **Récupérateurs :** la sole est placée entre deux récupérateurs de chaleur permettant le préchauffage de l'air (1200°) envoyé dans le laboratoire.

Ils travaillent alternativement pour permettre le chauffage des récupérateurs avec les fumées qui sortent du laboratoire.

L'inversion de la marche de l'air s'opère de manière semi-automatique d'après le temps et la différence de température dans les récupérateurs.

e) **Les brûleurs :** pour le chauffage des fours Martin, on emploie comme combustibles : des gaz, de l'oxygène, du fuel-oil pulvérisé par l'air comprimé. Les éjecteurs de gaz, du fuel et d'oxygène sont logés dans une enveloppe commune, refroidie par eau.

Le fondeur a la possibilité de régler, à partir du pupitre de commande, l'inclinaison des brûleurs et la longueur de leurs flammes.

La capacité très variable peut dépasser 200 tonnes d'acier.

❖ **Conduite des opérations :**

1° chargement du four : On commence par introduire les paquets de ferraille au moyen de pelles mécaniques (60 à 80%). On introduit ensuite de la chaux + la fonte liquide au moyen de poches spéciales.

2° Fusion et affinage : Quand le chargement est terminé, on donne le vent et les brûleurs sont réglés.

L'affinage se poursuit en même temps que la fusion en procédant de temps en temps à des additions de minerais. Comme dans l'affinage au convertisseur, le Si et le Mn s'oxydent les premiers, et finalement le carbone.

Le phosphore passe dans les scories.

3° Essais : on prélève des échantillons de métal quand on juge l'affinage suffisant.

4° Addition finale : on décrasse soigneusement le bain en enlevant la scorie et on procède aux additions finales, ferro-alliages.

L'opération est très longue, plusieurs heures, mais elle permet d'obtenir des aciers mieux dosés.

2.7. Electrosidérurgie :

Acier électrique (**FIGURE : 2.11**)

2.7.1. Four à arc (Caractéristiques) :

- **L'arc électrique :**

Le plus important parmi les procédés de fabrication d'acier à l'aide de l'énergie électrique comme source de chaleur est le procédé **du four à arc électrique.**

L'aciériste se sert, au lieu d'une flamme, d'un arc électrique produit entre d'énormes électrodes de graphite et le contenu du four.

- **Haute température :**

Grâce à la température élevée de l'arc électrique (3500° C) on peut atteindre de hautes températures de fusion et dépasser 1800° C.

Elle favorise également la dissolution de matières et d'alliage à fusion difficile.

- **Elimination du soufre et du phosphore :**

La haute température de fusion permet la formation de scories très liquides fortement basiques, grâce auxquelles on obtient une élimination particulièrement bonne **du soufre et du phosphore.**

Abaissement du taux en oxygène (réduction).

La teneur en oxygène du bain peut être abaissée à un taux minimum car on peut utiliser des laitiers carburés.Non intervention de l'atmosphère du four.

Le laboratoire du four électrique est pratiquement clos. L'atmosphère au-dessus du bain peut être oxydante au début ; mais pour peu que l'on prenne soin d'éviter tout tirage l'atmosphère ne se renouvelle pas, les gaz oxydants sont remplacés progressivement par les gaz réducteurs où neutres qui se dégagent du bain.

Pas d'oxydation des éléments d'alliage.

L'atmosphère est donc neutre et les réactions s'effectuent uniquement entre le métal et les additions

On peut fondre les éléments oxydables (Cr ,W , Ni, Mo) sans craindre de perte par oxydation.

<u>En résume</u> : élimination poussée du phosphore, du soufre et de l'oxygène.

On arrive aux teneurs limites suivantes :

P 0,01% **S** 0,008% **O** 0,003%

- **<u>ACIERS ELECTRIQUES :</u>**
  - **Aciers au carbone**
  - **Aciers alliés**
  - **Aciers rapides**
  - **Aciers inoxydables**
  - **Aciers réfractaires**
  - **<u>Aciers électriques</u>**
- **<u>Four Héroult</u> (Figure : 2 ,11**)

<u>(Four à arc électrique et sole non conductrice)</u>

Le principe Héroult , selon lequel la formation d'un arc électrique entre les électrodes et passant par la charge, **s'est imposé par rapport à d'autres systèmes.**

<u>Principe</u> : par oxydation du carbone de la fonte au moyen d'un oxyde de fer (minerai).

Par mélange et fusion de ferrailles et de fonte.

Par mélange et fusion des matériaux nécessaires à l'obtention du produit désiré : acier et métaux d'addition.

<u>Four :</u>

Le four a la forme d'une poche en acier revêtue intérieurement d'un garnissage réfractaire.

La voûte est amovible et son garnissage silicieux doit résister aux très hautes températures

Elle comporte des alvéoles laissant traverser trois électrodes de graphite.

Les électrodes sont montées sur potence de hauteur réglable.

Toute la construction est montée sur un chemin de roulement en arc de cercle facilitant le basculement du four pour la coulée de l'acier ou du laitier.

La charge s'effectue en une seule fois, la capacité des fours est très variable de 0.5 à 200 tonnes environ. Pour un four possédant une cuve de 7400 mm.il faut une puissance du transformateur de 50 000-68 000 k V A. Les tensions s'étagent en général entre 80 et 500V.

Pour un grand four, la tension maximale en période de fusion peut atteindre 560 V.

Les diamètres des électrodes sont de 600 mm. La capacité maximum est de 180 tonnes.

- **Conduite des opérations :**

1° Chargement des matières. Le four est chargé à l'aide du panier de riblons, de minerai oxydé et de chaux pour la formation du laitier.

2° Fusion et oxydation. Le phosphore passe au laitier et le fer s'oxyde après élimination complète du phosphore.
Le bain est recouvert d'une scorie noire oxydée. La teneur en carbone du bain est alors basse.
Une prise d'éprouvette renseigne sur la fin de cette phase.

3° Décrassage complet. La déphosphoration étant terminée, le bain suffisamment chaud et le laitier suffisamment fluide, on arrête le courant et on décrasse soigneusement . Car il est nécessaire que pendant la période suivante, qui ne sera plus oxydante, le phosphore ne puisse pas repasser du laitier dans le métal.

4°Désoxydation et désulfuration.
On rétablit le courant et l'on ajoute de la chaux et des fondants (spath-fluor, silice alumine) pour refaire un deuxième laitier.
La haute température réalisée permet la formation de carbure de calcium, excellent réducteur, qui se diffuse dans le laitier où il accélère la désoxydation et par la suite la désulfuration.
On ajoute également des déchets d'électrodes ou de l'anthracite dont le rôle est de

désoxyder le laitier.

Il est facile de reconnaître que le laitier est pauvre en oxyde : il devient blanc.

5° Additions finales. Après les essais technologiques sur les échantillons et l'analyse chimique de l'acier , on procède aux additions finales en ajoutant des ferro-alliages, ou les éléments alliés (Ni, Cr, W , Co, etc.) pour ajuster l'acier à la composition voulue.

6° La coulée. Le métal amené à la température et à la composition recherchée peut être coulé après le décrassage.

- **UTILISATION DES INJECTIONS :**

Au four électrique à arc (figure : 2, 12)

A. La déphosphoration : elle se fait par insufflation au moyen d'une lance émergée, refroidie à l'eau, d'un mélange de chaux et de spath en poudre véhiculé par l'oxygène pur. Le débit de poudre et le débit d'oxygène, contrôlés automatiquement, apportent ainsi à l'intérieur du four les éléments nécessaires à la composition du laitier.

B.La décarburation : elle s'effectue par insufflation, au moyen d'une lance immergée, de poudre de graphite ou de coke véhiculée par l'air dans le bain d'acier recouvert ou non de laitier.

C. La désulfuration : elle s'effectue par insufflation de chaux et de magnésium véhiculés par l'azote ou l'argon, au moyen d'une lance immergée.

D. Les additions métalliques :

1. Produit de réduction
2. Ferro-alliages

Les additions s'effectuent ainsi par insufflation, véhiculées par air ou par azote, toujours au moyen d'une lance immergée.

- **Aciers électriques :**

2.7.2. Le four à induction (Figure : 2, 14)

Le four à induction, considéré pendant longtemps comme outil de luxe réservé aux fabrications de quantités minimes de métaux très spéciaux, est devenu aujourd'hui un

outil de production de masse qui, tout en restant très loin des capacités évoquées dans les procédés précédents, a cessé d'être un << petit four » Sa capacité, limitée à quelques tonnes jusqu'en 1950 , atteint maintenant pour l'acier environ 20 tonnes.

Avantages :

-Bon mélange de la charge fondue.

-Obtention d'alliages parfaits, suivant analyse.

-Bonne régulation de la température en adaptant judicieusement l'amenée de puissance par réglage de la tension.

-Aucune surchauffe locale, d'où pertes au feu minimes, même lors de la fonte de copeaux

-Frais minimes d'exploitation et d'entretien.

Principe :

Mélange et fusion des matériaux nécessaires à l'obtention du produit désiré : acier et métaux d'addition.

Four :

Le four à induction est constitué par un creuset cylindrique en matière réfractaire (acide, basique ou neutre) entouré d'un tuyau de cuivre à grand nombre de spires, servant de circuit primaire, par lequel on fait passer de l'eau de refroidissement et du courant alternatif de quelques centaines à plusieurs dizaines de milliers de périodes par seconde.

Des courants de très forte intensité sont ainsi «induit» dans la masse métallique formant circuit secondaire -- ferraille par exemple – placée dans le creuset à l'intérieur du champ magnétique et provoquant l'élévation de la température nécessaire à la fusion. Une enveloppe extérieure en tôle d'acier maintient le tout et comporte le dispositif de basculement du four pour la coulée de l'acier.

Conduite des opérations :

1° La charge est constituée par des riblons sélectionnée, des alliages précis, des ferro manganèse, des ferro-siliciums, etc…

2° Fusion et affichage : les réactions d'affinage y sont limitées, bien que favorisées par un brassage du bain dû aux forces électromagnétiques.

Dans le four à induction à creuset, il n'est pas possible de travailler avec de la scorie liquide, étant donné que la scorie est chauffée par le métal et ne peut atteindre les températures requises pour la liquéfaction des scories ;par contre, il est possible de procéder à la désulfuration avec de la scorie sèche.

En raison de l'absence du graphite des électrodes, il n'y a pas de carburation du bain.

L'affinage à l'oxygène ne peut être pratiqué qu'avec certaines restrictions à cause de l'usure excessive du creuset.

3° Prise de l'éprouvette.

4° Additions finales.

Après le décrassage, dès que le bain est suffisamment pur, on ajoute les quantités voulues des ferro-alliages.

5° Coulée de l'acier électrique.

2.8. Application du vide en aciérie :

Les recherches effectuées en laboratoire et en atelier ont montré l'influence néfaste des gaz en solution dans l'acier.

-**L'hydrogène provoque** : flocons et fissurations capillaires.

-**L'azote** : le vieillissement et les inclusions de nitrures.

-**L'oxygène** : les inclusions d'oxydes.

Par le traitement sous vide, on a la possibilité d' éliminer en partie ces gaz, ce qui entraine une amélioration de la ductilité de l' acier (allongement et striction)

Ce traitement sous vide réservé pour les aciers spéciaux tend à devenir une pratique courante en aciérie.

La mise en œuvre de cette technique du vide a été faite suivant les processus suivants :

❖ **PREMIER PROCÈDE ::**

Dégazage de la masse de métal (Figure : 2, 15)

Principe

Traitement sous vide de métal liquide en poche ou en lingotière après l'élaboration par les procédés classiques (le four Martin, les convertisseurs Thomas, Bessemer ou à oxygène, les fours électriques à arc à induction).

Conduite des opérations :

Placer la poche de coulée dans une cuve à vide.

L'efficacité de ce traitement très simple est rapidement éliminée dans le cas de poches de grande profondeur, **le dégazage de l'acier situé dans la partie inférieure de la poche est médiocre.**

❖ **DEUXIEME PROCEDE :**

Traitement du jet d'acier au défilé (**Figure : 2, 15**)

Principe :

(Bochumer Verein en Europe, F. J. Stockes aux Etats-Unis.)

Conduites des opérations :

La poche venant du four d'élaboration n'est pas mise sous vide, mais on fait écouler le métal provenant de la poche principale dans une poche intermédiaire placée sur la cuve à vide.

De cette poche intermédiaire l'acier va s'écouler dans la cuve où sera placée une autre poche ou une lingotière.

C'est donc essentiellement le jet de métal qui est soumis aux dégazage .

Les inconvénients sont :

Refroidissement de l'acier et, d'autre part, l'éclatement du jet, qui se produit en général lorsque celui-ci est brusquement soumis au vide ,peut être préjudiciable à la coulée Certains profils de busettes mis au point par l'irside ont porté. remède à cet inconvénient.

- **TROISIEME PROCEDE** (**Figure : 2, 16**)

Traitement du prélèvement de métal contenu dans une poche :

- **Principe :**

Circulation du métal sous vide.

Utilisation de la pression atmosphérique pour faire remonter une partie du métal dans un récipient sous vide placé au-dessus de la poche.

- **Appareil :**

Une chambre de dégazage avec à sa partie inferieure deux canalisations immergées dans la poche de coulée.

- **Conduite des opérations**

Après avoir immergé les deux tubes dans le métal, la mise sous vide du récipient a pour effet de faire monter le niveau du métal dans les tubes et de le faire pénétrer dans le récipient où il se dégaze.

La circulation est obtenue par les deux principes suivants :

a) **Ruhrstahi-Heraeus (Europe).** Par un flux de gaz neutre introduit dans un des canaux, ce qui accélère la remontée de l'acier.

b) **Thermoflow et F. J. Stockes (USA)**. Par deux pompes électro- magnétique exerçant respectivement sur le métal contenu dans chaque tube une force de sens contraire.

Le même dispositif assure le chauffage par induction de l'acier dans les tubes.

Le débit de circulation est de 30 tonnes/min avec des tubes de 500 mm de diamètre intérieur pour une poche de 115 tonnes.

En résumé

Pour avoir un meilleur rendement au traitement sous vide, il faut éviter les pertes thermiques et avoir la possibilité d'effectuer des additions pour amener l'acier à la composition voulue.

Four à électrode consommable (Figure : 2, 17)

- **Principe :**

Refondre sous vide une électrode (l'électrode consommable) constituée par le métal élaboré à l'analyse cherchée.

Cette électrode peut être préparée par un four à arc électrique ou dans un four à induction sous vide.

- **Appareil :**

Voir dessin (**Figure : 2, 17)**

❖ **Conduite des opérations :**

L'électrode à refondre est fixée à un support relié à une source de courant continu : **pôle négatif.**

Après avoir fait le vide, on amorce l'arc , entre **le pôle positif,** constitué par le fond du creuset en cuivre.

La fusion de l'électrode et la solidification du lingot produit se poursuivent progressivement jusqu'à la fin de l'opération.

- **Caractéristiques :**

Pas de risque de contamination par le garnissage du creuset (Four à induction).

Le refroidissement rapide du lingot réduit la ségrégation.

Les inclusions ont tendance à se rassembler en tête du lingot par flottation.

L'ensemble de ces qualités a permis de réaliser des lingots très gros, 25 tonnes environ, en alliages très complexes et de rendre forgeables des qualités considérées inforgeables

❖ **Four à induction sous vide** (**Figure : 2, 17**)

- **Principe :**

Elaboration et coulée sous vide du métal.

- **Appareil :**

Voir dessin (**Figure : 2, 17**)

- **Conduite des opérations** (sous vide) :

1. La charge est constituée d'acier dont la composition est connue et de ferro-manganèse, ferro-silicium.

2. L'acier est fondu et purifié.

3. Additions de ferro-alliages pour la composition recherchée.

4. Le four est basculé et la coulée est effectuée en lingotières.

En résumé

Cette méthode permet d'obtenir une grande précision d'analyse et une propreté micrographique.

Pas de perte par oxydation, ce qui permet la composition d'alliages nouveaux contenant des additions importantes de produits très oxydables, tels que **titane** et **aluminium.**

2.9. La coulée de l'acier

A. **Coulée en source** (**FIGURE : 2.18**)

1. Poche de coulée en acier revêtue intérieurement d'un garnissage réfractaire.

2. Quenouille pour la fermeture.

3. Nourrice alimentant les lingotières par le bas. **Principe des vases communicants.**

4. Briques réfractaires percées d'un trou central formant canal. Ces dernières sont placées dans les rainures que comporte la plaque de bas en fonte.

5. Lingotière en fonte légèrement conique généralement ouverte en haut et en bas.

6. Lingotière avec masselotte.

B. coulée directe ou en chute

7. Plaque de bas en fonte.

C. Coulée continue –Modèle « S »

8. Panier distributeur pour plusieurs lingotières.

9. lingotière curviligne en cuivre avec refroidissement à eau pour obtenir des **billettes, brames et blooms.**

10. Chambre de réfrigération. Pulvérisation d'eau pour continuer le refroidissement.

11. Corset de guidage en arc de cercle.

12. Redresseuse.

13. Chalumeau oxycoupeur pour la coupe des barres.

Le chalumeau se déplace à la même vitesse d'évacuation de la barre pour obtenir une coupe droite.

La coulée continue supprime : lingot, four de réchauffement et le train de blooms.

2. 10. Les défauts des lingots :

2. 10. 1. Retassure :

Le passage de l'état liquide à l'état solide est accompagné d'une diminution de volume (retrait).

Le refroidissement s'effectue à partir des parois et se développe perpendiculairement à celle-ci, donc la retassure se produit dans la partie qui se solidifie en dernier lieu.

Moyens de remédier

L'élimination par chutage, qui consiste à enlever la partie du lingot conenant la retassure.

Pour diminuer l'importance de la chute, divers procédée sont utilisés :

- Localiser la retassure en disposant les lingotières, la grande base en haut.
- Par l'emploi d'une masselotte (moule en terre réfractaire) placée sur le haut de la lingotière pour maintenir à cet endroit le métal liquide assez longtemps.
- Soit par réchauffage de la partie supérieure du lingot.

2. 10 2. Ségrégation :

La ségrégation se produit par l'accumulation des impuretés dans la partie du lingot qui se solidifie la dernière. A noter que la ségrégation, qui est très accentuée au voisinage de la poche de retassure, se produit également dans toute la région voisine de l'axe du lingot, tout en diminuant à mesure que l'on approche du pied du lingot.

- **Moyen de remédier :**

La coulée continue entraîne la suppression de la ségrégation majeure.

2. 10 3. Liquation :

La liquation se traduit par un manque d'homogénéité dans un même lingot, c'est-à-dire que toutes les parties d'un lingot n'ont pas la même composition chimique. La partie qui se solidifie la dernière (le centre) contient plus de carbone, de silicium et de phosphore que la périphérie.

- **Moyen de remédier :**

La coulée continue.

2. 10. 4. Soufflures :

Ce sont des poches dont les parois oxydées ne se ressoudent pas à chaud. Elles sont dues à la présence de gaz occlus dans le bain métallique persistant dans le lingot après la coulée et qui n'ont pu s'échapper au cours du refroidissement trop rapide.

- **Moyen de remédier :**

Pour réduire les soufflures au minimum, on introduit dans la poche de coulée de l'aluminium ($^1/_{1000}$ en poids de l'acier) ou du silicium, le dégagement gazeux cesse, **on dit que l'acier est calmé.**

2. 10. 5. Criques :

Les criques sont des déchirures de la peau du lingot, elles sont causées par le retrait.

- **Moyen de remédier :**

On les supprime par un écroûtage.

2. 10. 6. Tapures :

Déchirures internes causées par le retrait.

- **Moyens de remédier :**

En ralentissant le refroidissement de l'acier par une augmentation de l'épaisseur de parois de la lingotière.

En coulant à une température moins élevée.

2 10.7. Flocons :

Ils se traduisent par de faibles cavités produites par la présence de l'hydrogène dans la partie ségrégée du lingot.ils sont surtout fréquents dans les aciers à teneur élevée en constituants spéciaux (Ni, Cr, Mo).

- **Moyens de remédier :**

Ils peuvent être éliminés par un refroidissement lent.

2 10.8.Gouttes froides :

Elles prennent naissance lorsqu'on coule directement le métal dans les lingotières.

Des gouttelettes de métal jaillissent sur les parois de la lingotière, se solidifient et viennent se coller sur la peau du lingot.

- **Moyens de remédier :**

Lorsqu'on coule en chute, il faut régulariser le débit de l'acier, ce qui réduit la violence de l'impact du jet de coulée.

2 11. Ferro-alliages

Composition : les ferro-alliages sont formés de fer, de carbone et d'un élément essentiel : Si, Mn, W ou Mo, etc.…, qui domine avec des teneurs pouvant atteindre 70 à 90%

Utilisation : les ferro-alliages sont presque exclusivement utilisée comme addition finales dans la fabrication de l'acier, soit pour désoxyde et ajuster le bain, **ferro-manganèse, ferro – silicium**, soit pour introduire les éléments dans l'acier allié, **Cr, W, Mo**, etc.

Fabrication :

Les Ferro –siliciums dont la teneur en Si est inférieure à 15%et **les ferro-manganèses** titrant mois de 25%de Mn, appelés **Spiegels,** sont fabriqués dans le haut fourneau.

Pour la grande majorité, le four électrique type Héroult sans voûte, ce qui facilite le chargement.

❖ **Principaux Ferro- alliage :**

1.Ferro- manganèse :

25 à 85% de Mn

0,05 à 6,5% de C

Un excès de silice dans la charge donne :

Silico-spiegel :

10 à 12% de Si

18 à 22% de Mn

Silico- manganèse :

20 à 30% de Si

50 à 70% de Mn

2. Ferro- silicium :

10 à 99% de Si

3 Ferro –chrome :

70 %de Cr

0,03 à12% de C

4. Ferro- tungstène :

80%de W

5. Ferro molybdène :

60%de Mo

6.Ferro – vanadium :

35 à 85%de V

7.Ferro- titane :

30 à 50% de Ti

8 à 12%de C

8. mangano- silico- aluminium,

18 à 22% de Si

18 à 22% de Mn

9 à 12 % Al

9. Silico- aluminium,

30 à 75% Si

10 à 50 % Al

3.0 Etude des principaux essais :

Généralités :

Les matériaux employés dans les constructions :

1- Constructions civiles : ponts, bâtiments, routes, etc.
2- Constructions mécaniques : meuleuses, tours, fraiseuses, etc.
3- Constructions d'engins : avions, fusées, automobiles, etc.., doivent résister à des forces dites de sollicitations qui tendent à les déformer, les user ou même à les briser.
   L'étude de leurs propriétés mécaniques appelées caractéristiques donne un intérêt capital.

But de la résistance des matériaux :

4-faire le choix des matériaux employés dans une construction donnée.

5-déterminer les formes et les dimensions des pièces pour obtenir des constructions solides et économiques, c'est-à-dire, le poids de matière le plus faible avec la plus grande résistance possible.

6- les traitements thermiques ou autres.

7-mesurer ou évaluer les déformations subies par ces pièces.

8-calculer la grandeur et le sens des sollicitations exercées sur une section donnée de la pièce, sollicitations qui sont habituellement évaluées :

Système **SI [N/mm^2]**

3.1 Essais de traction : essai statique.(FIGURE :3.0)

Définition :

Une éprouvette de la matière à contrôler, de forme et de dimensions déterminées, est soumise à l'aide d'une machine spéciale à un effort de traction pur, suivant l'axe géométrique de l'éprouvette, augmentant lentement jusqu'à la rupture.

Pour éviter toute action dynamique, l'augmentation de la sollicitation ne doit pas excéder **10N/mm²** de section par seconde.

La température reste pratiquement invariable au cours d'un même essai.

Des appareils adaptés à la machine permettent de mesurer à chaque instant l'effort de tracion, c'est-à-dire la charge et l'allongement correspondant de l'éprouvette.

3.1.1dètails des éprouvettes :

Il est à noter les résultats des essais dépendent non seulement de la sensibilité des appareils utilisés, mais encore des précautions prise au cours du prélèvement et de l'usinage des éprouvettes.

Ces dernières devront toujours être terminées par une passe de finition destinée à enlever toutes les amorces de rupture que constituent toujours les tralts d'outils, cette phase de finition comprendra un polissage à la toile abrasive à grains fins ou une rectification à la meule.

Pour l'usinage, ébauche ou finition, l'emploi d'un bon arrosage est indiqué.

3.1.2 Diagramme de l'essai de traction (FIGURE : 3.6)

Les machines de traction donnent l'enregistrement graphique de l'allongement de l'éprouvette **(A[%] ou[mm])** en fonction de la charge **F[N] .**

Selon la section de l'éprouvette, il est possible de déterminer la tension R(appelée également charge unitaire ou contrainte), quotient de la charge **F[N**] par la section **So[mm^2].**

1er pèriodr.domaine élastique :

Selon la loi de Hooke, les allongements sont proportionnels aux charges unitaires ; si l'effort de traction devient 2 ou3 fois plus grand, l'allongement devient également 2.respectivement 3 fois plus grand, **(FIGURE ; 3.1)**

Domaine élastique : la déformation subie sous l'effort de traction ne persiste pas après enlèvement de cet effort ; l'éprouvette repend sa longueur primitive, d'où persistance de la cohésion molèculaire.mais le dérangement cristallin pour certains matériaux n'est pas instantané, il doit se produire à ce moment un certain trouble, d'où difficulté de définir exactement la limite d'écoulement.

On considèrere à sa place la charge unitaire pour laquelle l'allongement permanent est de 0.2%de Lo **(FIGURE ; 3.2)**

2erpèriode. Domaine des déformations permanentes :

Domaine plastique ; l'éprouvette reste allongée après suppression de l'effort, autrement dit : sa déformation est permanente.

C'est la période des grands allongements qui croissent plus vite que les charges, d'ou diminution de la section. La charge maximum F, en [N], est la plus grande charge supportée par l'éprouvette au cours de l'essai.

3er pèriode .striction et rupture :

Apparition du phénomène de striction ou diminution localisée de section **(FIGURE ; 3.3)**

La striction est accompagnée d'une diminution de la charge agissant sur l'éprouvette, jusqu'à rupture de l'éprouvette.

Un matériau cassant ne peut être déformé, un tel matériau se casse en pratique avant que ne se produise aucune striction.

Exemple : acier trempé, fonte, etc. **(FIGURE ; 3.4)**

Exemple : cuivre, grande allongement. **(FIGURE ; 3.5)**

L'allongement spécifique après rupture A :

Exprimé en pour –cent est l'allongement permanent de l'éprouvette rompue (Lu-L0) divisé par la longueur initiale entre repère L0.il est déterminé par **la formule** :

A [%]=(Lu-L0/L0)*100

Tensions :

La tension, ou charge unitaire, exprimée en **N/mm²** est le quotient de la charge par la section initiale **S0** de l'éprouvette et cela à chaque instant de l'essai.

Remarquons que la charge ne signifie rien sans la surface de la matière **(S0).**

La tension est une grandeur très représentative puisque l'on peut s'imaginer le nombre de **N** "attachés" à chaque millimètre carré de matière sollicité en traction.

A Chaque charge correspond donc une tension dans le diagramme de la **figure 2-6**.la plus importante est la tension correspondant à la charge maximum F : elle est désignée par le terme de résistance à la traction **Rm [N/mm^2] =Fm/S0**

3.1.3 **Facteur de sécurité n :**

La matière ne peut raisonnablement être utilisée en dehors du domaine élastique **(1erpèriode de la figure 2-6).**or, la matière est caractérisée très souvent par sa résistance à la traction **Rm.**

En introduisant la notion de facteur de sécurité **n**.il apparait alors une tension **Radm=Rm/n**

Cela signifie que **Radm** est inférieur à la limite d'écoulement, donc dans le domaine èlastique (voir exemple pour n=3**)(FIGURE ;3.6)**

Remarque :

Plus n est grande, plus la sécurité de la construction augmente, tout en se souvenant que le poids de matière augmente également

Exemple de calcul à la traction (**FIGURE ;3.7) :**

Calculer le diamètre (d) du barreau, AC 45-2, sollicité en traction par une charge (F) de 18000N avec une sécurité (n) de 5.

Solution :

la dénomination Ac 45 signifie que son Rm =450 [N/mm^2].

Par définition, nous pourrons poser :

Radm=Rm/n=450/5=90**[N/mm^2].**

Section (s_0)=F/Radm=18000/90=200mm²

d=15,95mm

Réponse :

d=16mm, arrondi suivant le stock des barres d'acier disponibles.

3.2. Essais de dureté

Généralités

La dureté, de symbole H , d'un métal peut être définie par la résistance qu'il offre à la pénétration sous pression (statique) ou avec choc (dynamique) d'un autre corps de matière plus dur que le métal à essayer.

On préfère dans la majorité des cas utiliser des procèdes permettant la mesure sans choc, soit d'un diamètre d'empreinte du pénétrateur :

3.2.1. Dureté **BRINELL**

3.2.2. Dureté **VICKERS**

Soit d'une profondeur de pénétration

3.2.3. Dureté **ROCKWELL bille**

Dureté **ROCKWELL cône**

Ces essais, pour la plupart non destructifs, trouvent leurs applications dans les cas suivants :

1. Dureté des métaux à usiner :
   Brinell, Rockwell bille
2. Efficacité d'un traitement thermique :
   Rockwell, Vickers

3. Dureté d'un traitement de surface, cémentation, nitruration, recouvrement :

Vickers

Remarque :

La préparation de la surface qui recevra le préparation doit être l'objet de grands soins.

Elle doit être polie, en évitant tout échauffement et tout écrouissage superficiels.

3.2.1.Essai Brinell

Symbol HB

Le pénétrateur est une bille en acier trempé.

Principe

Amener la bille en contact avec la surface a essayer(figure :3.8).

Charger la bille, **progressivement et sans choc,** d'un poids correspondant au diamètre de la bille, de manière à atteindre la charge maximum en 15 secondes.

Maintenir cette charge pendant 15 secondes pour les aciers, et 30 secondes pour les métaux non ferreux.

Mesurer l'empreinte laissée par la bille, au centième de millimètre près, au moyen d'un microscope à oculaire micrométrique.

La dureté HB est exprimée par le rapport de la charge appliquée sur la bille, par la surface de l'empreinte dans la matière.

Remarque :

Il est recommandé de ne soumettre à l'essai BRINELL que des matières dont la dureté est inférieure à 4000 N/mm² ou la résistance à la traction d'environ 1400 N/mm² **(tableau 3-10).**

Choisir la charge de façon que l'empreinte laissée par la bille soit de :d=0,3D à 0,6D.

La distance des centres de deux empreintes voisines doit être égale à 3d au moins et 2d du bord de la pièce **(figure : 3.11)**

On ne doit en aucun cas constater une déformation à l'envers de la face portant l'empreinte.

Pour les essais, on prend la moyenne des résultats donnés par au moins deux, généralement trois empreintes voisines.

3.2.1.1.Relation entre la dureté HB et l'essai de traction

La relation entre la dureté HB et l'essai de traction, seulement pour les aciers au carbone ou les aciers faiblement alliés, est sensiblement égale au tiers de la dureté BRINELL.

Cette relation ne signifie pas que l'essai BRINELL remplace l'essai de traction.

3.2.1.2.Procès-verbal d'essai

Le symbole HB désigne l'essai normale :bille de 10 mm de diamètre chargée à 30000 N pendant 15 secondes.

Le symbole HB suivi de chiffres rappelle les conditions de l'essai :

Exemple :HB 5 /750/15.

Bille de 5mm de diamètre chargée à 7500 N pendant 15 secondes.

Important

Les valeurs numériques HB dans les tableaux des aciers sont exprimées aux 1/10 de la résistance à la pénétration [N/mm²].

Exemple :

Résultat obtenu 2010 [N/mm²]=HB 201.

3.2.2.Essai Vickers

Dureté Vickers

Symbole HV

Le pénétrateur est un diamant. taillé en forme de pyramide à base carrée dont l'angle des faces est de 136°.

Principe(figure :3.12)

La pyramide en diamant est amenée en contact avec la surface à essayer.

Charger cette pyramide graduellement, sans choc et sans vibrations, à la charge maximum fixé.

En règle générale, maintenir cette charge pendant 15 secondes.

Mesurer l'empreinte laissée par la pyramide avec des appareils de haute précision munis de microscopes.

Le tambour divisé et le vernier donnent la longueur de la diagonale au dix millième de millimètre.

La dureté HV est le rapport de la charge appliquée sur le pénétrateur à la surface de l'empreinte laissée par la pyramide.

Remarques :

Le contrôle de la dureté VICKERS est un des plus précis.

- Il est utilisé pour les carbures métalliques ou l'efficacité d'un traitement thermique.
- Il convient pour le contrôle de pièce très petites et surtout de très faible épaisseur.
- Les charges généralement utilisées sont :50 N, 100N, 300N, 500N.

La dureté VICKERS est pratiquement indépendante de la charge exercée, les résultats obtenus avec des charges différentes sont comparables entre eux.

Il faut éviter d'utiliser la méthode VICKERS peur déterminé la dureté de la fonte malléable et de la fonte grise riche en carbone ou en graphite.

3.2.2.1. Procès-verbal d'essai

Le symbole HV 30 exprime la dureté VCKERS mesurée sous une charge de 300 N exercée pendant 15 secondes.

Le symbole HV 30/30 rappelle les conditions de l'essai :

300 N pendant 30 secondes.

Important

Les valeurs numériques H V dans les tableaux des aciers sont exprimées aux 1/10 de la résistance à la pénétration [N/mm^2].

Exemple :

Résultat obtenu 4100 [N/mm^2]=H V 410.

3 .2.3. **Essai ROCKWELL**

ROCKWELL BILLE Symbole **HRB**

Le pénétrateur est une bille en acier trempé de diamètre 1 ,59 mm ,exactement $^1/_{16}$de pouce anglais (figure 3 ,14)

DURETE ROCKWELL CONE Symbole **HRC**

Le pénétrateur est un cône de diamant dont l'angle au sommet est de120^0 ,l'extrémité est une calotte sphérique de rayon 0 ,2 mm (figure :3,15)

Remarque

La dureté ROCKWELL n'est pas indiquée pour les fontes malléables ou grises riches en carbone ou graphite .

3 .2 .3.1. Procès-verbal d'essai

Le symbole HRB désigne l'essai ROCKWELL bille.

Le symbole HRC désigne l'essai ROCKWELL cône.

Principe (figure : 3 ,16)

Le pénétrateur est amené en contact avec la surface à essayer et enfoncé progressivement avec une charge initiale :F_0 =100 N .

On amène le zéro du cadran en face de l'aiguille et le pénétrateur est soumis à une charge supplémentaire F :

F_1 Pour HRB =900 N

F_1 Pour HRC =1400 N

Lorsque l'aiguille ,qui se déplace dans le sens inverse des aiguilles d'une montre , s'est arrêtée , on supprime la charge supplémentaire F_1 pour ne laisser que la charge initiale F_0 .

En raison de la suppression des déformations élastiques de la matière , le pénétrateur remonte légèrement , l'aiguille du comparateur revient en arrière .

3.2.4. Essai KNOOP

Le pénétrateur est un diamant taillé en forme de pyramide à base de losange et dont la grande diagonale est 7,11 fois plus grande que la petite diagonale .

L'angle correspondant à la grande diagonale est de $172\ ^0$ 30 tandis que l'angle formé par les deux autres arêtes est de 130^0 . (figure :3 ,17)

Principe

Les charges sur le diamant sont en rapport avec la nature de l'essai .

On mesure l'empreinte laissée par la grande diagonale au moyen d'un microscope spécial

Une table fournit le chiffre de dureté Knoop en fonction de la charge et de la longueur de la grande diagonale

Remarque

L'avantage de l'essai Knoop est de permettre l'essai de matériaux très durs et en même temps fragiles.

La dureté knoop est intéressante en horlogerie pour mesurer la dureté des pivots ou des lames de ressorts dont les diamètres, respectivement les épaisseurs, sont de l'ordre de quelques centièmes de millimètre.

On l'utilise aussi pour déterminer la dureté des pierres employées en horlogerie.

3.2.5.Tableau de comparaison (figure : 3,18)

Les chiffres de cette table ne sont que des valeurs de comparaison et ne sont donnés qu'à titre indicatif.

*le facteur 0 ,34est employé pour l'acier trempé et revenu de moyenne résistance.

-le facteur 0,36 est employé pour l'acier au carbone recuit ou non traité, ainsi que pour l'acier à haute résistance après trempe, avec ou sans revenu.

**HB $^{1}/_{10}$ de la résistance à la pénétration [N / mm^2]

**HV $^{1}/_{10}$ de la résistance à la pénétration [N/mm^2] .

3.3 Essai au choc

Essai dynamique.

Généralités

On dit qu'un corps est fragile lorsqu'il se rompt sous l'action de chocs ou d'effort brusques.

Un même corps peut être à la fois très dur et très fragile.

Exemple : le diamant, le verre, l'acier trempé, la fonte, etc……

Définition (FIGURE : 3.19)

L'essai au choc consiste **à rompre en un seul coup**, à laide d'une machine spécial dite «mouton- pendule», une éprouvette de dimension dèterminèe, prèalablement entaillée en son milieu, et à mesurer l'énergie absorbée par ce travail de rupture.

Résilience= l'aptitude que possède un métal à résister au choc que l'on désigne par la lettre **K.**

Grande résilience signifie matériau tenace.

3.3.1. Éprouvette.

L'éprouvette est préparée suivant les indications de (FIGURE :3.20)

on ne tolèrera en aucun cas des stries parallèles à l'axe du trou au fond de l'entaille.

3.3.2. Machine (FIGURE : 3.19)

La machine d'essai (mouton) doit être de construction rigide et reposer sur un socle solide.

La vitesse du mouton au moment de l'impact doit être de 5….7 m/s.

Le plan d'oscillation du pendule doit passer le plus exactement possible par le centre de gravité du bâti de la machine (A).

3.3.3. essai

On soulève le pendule jusqu'à la position d'arrêt 1, puis on l'abandonne ; le couteau viendra frapper l'éprouvette sur la face opposée à l'entaille et la brisera.

La résistance de l'éprouvette absorbe une partie de l'ènergie nècessitèe par sa rupture, de sorte que le pendule ne remontera qu'en position 2.d'où perte de hauteur $\Delta h=h-h'$

K=travail de rupture [J]/section de l'éprouvette $\mathbf{S_o\ [cm^2]}$

$\mathbf{K\ [J/cm^2]=F.\ \Delta h\ /\ S_o}$

Remarques

Les résultats ne sont comparables que pour des éprouvettes de même modèle.

3.4. Essai de pliage. (FIGURE : 3.21)

Généralité

L'essai de pliage a pour but de déterminer la ténacité de la matière au pliage.

Principe

On place l'éprouvette sur deux rouleaux d'applui parallèles, on la fléchit en appliquant à mi-distance des rouleaux un mandrin demi- cylindrique.

a) Pliage jusqu'à un angle donné, 90 ou 180°.
b) Pliage autour d'un mandrin de diamètre égal à l'épaisseur de l'éprouvette.
c) Pliage à bloc ; l'achèvement du pliage se fait en agissant sur les extrémités de la bande.
d) Pliage sur cale ; le pliage s'achève sur cale placée entre les faces.

Remarque

Le pliage doit être exécuté lentement et sans interruption.

3.4.1. Eprouvette

L'éprouvette est généralement de section rectangulaire avec arêtes arrondies.

Epaisseur : 20 mm pour les produits semi-facturés et les pièces de forge.

Pour les tôles, elle est égale à celle de la tôle à essayer.

Pour les tôles dépassant 30 mm, la mise d'épaisseur est faite par usinage de l'une de ses faces.

3.4.2. procès- verbal

L'échantillon correspond si aucune fissure n'apparaît dans la zone de traction.

A l'apparition des criques, on mesure dans l'axe de l'éprouvette, au moyen d'un gabarit en tôle, le plus petit rayon de courbure extérieur que l'on diminue de la moitié de l'épaisseur de l'éprouvette pour obtenir le rayon r. le coefficient de pliage de **T**etmajer **Bg** est donné par

la formule :

$$Bg_{(\%)} = (a/2r)*100$$

3.5. Essai d'emboutissage

Généralités

L'essai consiste à se rapprocher des conditions pratiques d'emboutissage. La tôle est à la fois refoulée et étirée, elle subit donc un effort diffèrent de l'essai de traction.

Principe

L'essai consiste à appliquer, au centre d'une éprouvette, un poinçon ou une bille de ø 20, qu'un effort mécanique ou hydraulique presse progressivement jusqu'à l'apparition des premières fissures.

3.5.1. Essai Erichsen (FIGURE :3.22)

L'éprouvette est de forme carrée 70*70 mm avec comme épaisseur maximale 2 mm.

IMPORTANT : l'éprouvette est laissée libre entre les mâchoires.

3.5.2 Essai Persoz (FIGURE :3.23)

L'éprouvette à un diamètre de 90 mm, avec comme épaisseur maximale 2 mm.

IMPORTANT : l'éprouvette est serrée entre les mâchoires.

3. 5.3. procès- verbal

On détermine la force F maximale, ainsi que la profondeur f maximale atteinte lors du déchirement de la pièce d'essai.

3.5.4. Emploi

L'essai permet de comparer les propriétés d'étirage (en profondeur) des tôles et bandes métalliques.

Contrôle de la qualité du recuit des tôles : non recuites ou mal recuites, flèche plus petite que la normale.

3.6. Essai de fatigue

Généralités

Les essais de traction, de choc et de dureté ne permettent pas de qualifier les métaux en vue de toutes leurs applications.

Les recherches poursuivies sur la fatigue ont montré l'insuffisance de ces essais.

Les pièces soumises à des efforts variables et répètes se rompent au bout d'un certain temps, sans que jamais la contrainte n'ait dépassé la tension de rupture (Rm) et même la charge limite d'écoulement (Re).
Il est donc indispensable de faire sur les métaux des essais dans des conditions aussi voisines que possible de leur utilisation.
Ce sont les essais de flexion par rotation qui ont permis de réunir la plus grande partie de la documentation sur la fatigue.

3.6.1. Essai de fatigue par flexion rotative (FIGURE :3.24)

Principe

On soumet à une rotation autour de son axe une éprouvette, de type donné, dont l'extrémité est fixée de façon rigide dans l'arbre du moteur (M) et à l'extrémité de la partie libre est suspendu un poids.
Pendant la rotation, les fibres de l'éprouvette sont alternativement tendues et comprimées.

Important

L'éprouvette est meulée pour ne pas avoir d'amorces de cassure dues au tournage.

Exemple : la fibre «A» est tendue et la fibre «B» comprimée, pour un demitour la fibre «A» devient comprimée et la fibre «B» tendue. Le taux de travail est maximum pour les fibres de la périphérie.

Limite de fatigue

Si l'éprouvette n'est pas rompue au bout d'un nombre d'alternances conventionnelles ; 10-20-30 ou 100millions suivant le métal à essayer, la charge appliquée est inférieure ou égale à la limite de fatigue.

Alternance

Deux variations de l'effort F(tendu et comprimé). (FIGURE :3.24)

3.6.2. Courbe Wöhler (FIGURE :3.24).

On essais une série d'éprouvettes du même métal avec des charges décroissantes (F1-F2-F3,etc.…) et l'on note pour chacune d'elles les nombres croissants correspondant d'alternances où la rupture a lieu ou n'a pas lieu. Chaque éprouvette est soumise à une seule charge pendant toute la durée de l'essai.

3.6.3. Résultats obtenus

Influence de l'état de surface

Les rayures d'outil constituent des amorces de cassure, elles diminuent dans des proportions assez grandes la limite de fatigue.

Changements brusques de section

Les trous, les entailles ont une influence sur la tenue des pièces soumises aux efforts variables.

Certains traitements thermiques

Incorrectement exécutés, diminuent également la limite de fatigue.

Influence de la forme des pièces

(X, Y, Z)(FIGURE : 3.24)

3.7. Essai de fluage

Généralités

La connaissance des propriétés mécaniques à haute température est d'une grande importance (tableau. 3.25)

Un métal ou un alliage soumis à un effort statique continu d'une certaine valeur, se déforme et même se rompt, en fonction du temps à partir d'une certaine température.

Pour la construction de turbines à gaz, turboréacteurs, des soupapes de moteurs à explosions subissant une charge mécanique pendant de longues périodes, à hautes températures, il faut tenir compte non de la limite d'élasticité mais de la résistance au fluage.

Principe

On soumet plusieurs éprouvettes de traction à une charge et une température constantes pendant un temps de :

1° 45 heures pour les essais de courte durée.

2° 10000 heures pour les essais de longue durée.

En variant les charges et en relevant l'allongement temps, on peut déterminer la résistance au fluage (FIGURE .3.26)

3.7.1. procès – verbal

La résistance au fluage est la charge statique maximale que peut supporter indéfiniment une éprouvette sans qu'il y ait rupture.

Toutefois, les valeurs ainsi déterminées sont si basses qu'elles ne peuvent utilement sevir au calcul des dimensions des pièces en service.

Pour cette raison, on tolère en général une contrainte des pièces plus élevée, mais parallèlement on décide de limiter la durée d'emploi des pièces.

3.8.Essai de aux rayons X

Historique

En 1895, le physicien allemand röntgen découvrit, par hasard, des rayons capables de traverser la main et un écran fluorescent.

En raison du caractère mystérieux de ces rayons, il leur donna le nom de rayons X.

En 1913, le chimiste américain W.D Coolidge, inventeur d'un tube cathodique à chaud, vient apporter une très grande amélioration.

Principe (FIGURE : 3.27)

L'émission des rayons X est due au choc d'un faisceau d'électrons projetés à très grande vitesse sur un obstacle matériel.

Le faisceau d'électrons est généralement obtenu dans un tube à émission thermoélectrique

(A)

Ce tube est formé d'un ballon de verre portant deux tubulures diamétralement opposées sur lesquelles sont soudées deux électrodes (cathode négative et anode positive).

Il règne dans ce tube un vide aussi poussé que possible, afin de ne pas ralentir les électrons.

La cathode : Chargée négativement, est constituée par un filament spiralé de tungstène porté à l'incandescence par un courant à basse tension (B).

A haute température, une évaporation électronique se produit, le métal émet des électrons et d'autant plus que la température est élevée.

L'anode : chargée positivement est une pièce en cuivre taillée obliquement par rapport à l'axe longitudinal du tube, dans laquelle est encastrée une pastille de tungstène (anticathode) ou d'un autre métal à point de fusion élevé.

Les électrons : ils entrent dans la composition de tous les atomes, ce sont des corpuscules chargés négativement auxquels on communique une grande accélération en établissant une forte tension de plusieurs milliers de volts entre les électrodes.

Les électrons sont aspirés par l'anticathode chargée positivement (C).

En frappant l'anticathode, les électrons ou rayon cathodique émettent des rayons X, mais la presque totalité de l'énergie cinétique des électrons est transformé en chaleur.

Cette élévation de température est donc abaissée par une circulation d'eau ou d'huile à l'intérieur de l'anode (D).

3.8.1. Emplois

Contrôle de la bonne exécution des soudures. Pour les moulages, décèle les vanités

(Soufflures, porosités, criques, retassures) et l'inclusion (scories, laitier).

3.9. Gammagraphie

Les rayons gamma produits par une dèsintègration de la matière, corps radio-actifs comme le radium, s'apparentent de façon très proche aux rayons X, mais ils ont une force de pénétration considérable.

Les rayons gamma peuvent traverser une plaque de plomb de plus de 100 mm d'épaisseur.

Pour obtenir des rayons X aussi durs, donc aussi pénétrants, il faudrait une tension de plus de un million de volts.

Principe

On utilise des éléments à radioactivité artificielle créée dans les piles atomiques par un bombardement de neutrons, tels que le radiocobalt 60 avec une durée de cinq ans et la radiotantale 182 de quatre mois de durée.

Les éléments créés artificiellement sont aussi efficaces que le radium difficile à obtenir et très onéreux.

3.9.1 Même emploi que les rayons X.

De grosses pièces de fonderie à parois très épaisses (200 mm et plus).

On peut mesurer l'épaisseur des parois de récipients métalliques pour voir l'importance des ravages causés par l'oxydation.

Remarques

Ils n'exigent pas l'emploi d'installation compliquée, une surveillance continue en cours d'essai n'est pas nécessaire et la méthode peut être utilisée en n'importe quel endroit des pièces.

Il faut observer les règles de protection contre les rayons gamma, dangereux pour le corps humain.

3.10. Ultra- sons

Historique :

1880, découverte de l'effet « pièzo- électrique» du cristal de quartz par les frères curie.

1917, paul Langevin utilise le premier l'effet «pièzo- électrique» du cristal de quartz pour produire des Ultra- sons .

3.10.1. ondes sonores

Généralités (FIGURE : 3.28)

L'amplitude des vibrations est indiquée par la distance AB (A).

Frèquence, nombre de périodes complètes accomplies en une seconde (B). La fréquence se désigne en hertz, kilohertz ou mégahertz.

Exemples :

-1000000Hz

-1000 kHz

-1 MHz

Ultra- sons, ondes sonores dont la fréquence est supérieure à 20000 Hz ou 20 kHz.

L'ouïe humaine ne peut capter que les sons dont la fréquence est comprise :

Entre 16 Hz et 20000 Hz.

Infra –sons, les sons dont la fréquence est inferieure à 16Hz les revenir à la ligne animaux, dont le chien, peuvent entendre des ultra –sons de 30000 Hz. (sifflets spéciaux à ultra –sons.)

La vitesse du son se propage :

Dans l'air à 340 m/s. ou 1224 km/h.

Dans l'eau à 1504 m/s .ou 5414 km/h.

Dans l'acier à environ 5850 m/s .ou 21060 km/h.

Echo : lorsque les ondes sonores rencontrent un obstacle fixe, elles se réfléchissent de telle sorte que l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

3.10.2. L'effet «pièzo- électrique»

Lorsque certains cristaux, dont le quartz, taillés spécialement sont soumis à une pression, ils produisent des charges électriques positives sur une des faces et négatives sur l'autre face. Si la pression fait place à la traction, ces charges électriques changent de sens.

En inversant le mécanisme, et en envoyant une charge positive ou négative sur le cristal de quartz, il se dilate ou se contracte.

En appliquant à la lame de quartz une différence de potentiel alternative, la lame se dilate ou se contracte à la cadence des alternatives de la tension électrique.

C'est –à- dire que ces faces vibrent comme une membrane.

Une tension de HF (40000Hz) appliquée sur la lame de quartz la fait vibrer à la même fréquence, ce qui produit les ultra –sons.

3.10.3. Différentes méthodes de contrôle des pièces

1° méthode par écho ou par réflexion… (C)

Dans cette méthode, on utilise un seul palpeur qui fonctionne en émetteur-récepteur.

En l'absence de défaut, l'onde émise traverse la pièce et se rèflèchit sur le fond (face opposée).

L'onde reçue sur le palpeur se traduit sur l'écran du tube cathodique par un écho dit «écho de fond» à une distance fixe de l'image de l'impulsion émise. Lorsqu'un défaut entre dans le champ du faisceau, il se réfléchit et provoque à la fois la disparition totale ou partielle de l'écho de fond et provoque

l'apparition d'un écho dit «de défaut » dont la position par rapport à l'impulsion d'émission indique la profondeur, dans le rapport A/L.

Cette méthode, la plus employée ; a l'avantage de ne nécessiter l'accès que sur une seule face de la pièce et de localiser les défauts en profondeur.

2°sondage en incidence oblique…. (D).

Le sondage s'effectue avec un palpeur à prisme.

Lorsque la pièce est homogène, l'onde subit plusieurs réflexions et en général ne revient pas.

En cas de défaut, il y a réflexion sur le parcours et une partie de l'énergie revient sur le palpeur par un trajet analogue. Cette méthode permet d'explorer des régions difficilement accessibles.

3°méthode par transparence…(E).

La pièce à examiner est placée entre deux palpeurs, le premier émetteur, le second récepteur.

Si la pièce présente un défaut, la hauteur de l'écho est d'autant plus faible que le défaut est important.

Cette méthode est peu employée car elle nécessite l'accessibilité des deux faces opposées de la pièce.

Il faut aussi que les deux faces soient parallèles.

Important

Les ultra- sons sont entièrement réfléchis par une très petite couche d'air. Pour assurer un bon contact acoustique entre la pièce et le palpeur, on interpose un fluide dit «de contact»

(Graisse, huile, ou eau selon les cas) (F).

3.10.4. Utilisations

Recherche d'une tapure de trempe par ondes de surface.

Sondage par écho d'une billette.

Sondage en incidence oblique d'un cordon de soudure, etc.

3.10.5. Choix de la fréquence

Le coefficient d'absorption étant proportionnel au carré de la fréquence, il s'ensuit qu'une fréquence élevée pénètre moin profondément qu'une fréquence basse.

Mais une fréquence élevée permettra de mieux déceler les petits défauts.

Des essais successifs permettent de connaître rapidement la fréquence la plus convenable en fonction des contrôles à assurer.

Les fréquences de 2-4-6 MHz s'emploient pour les aciers à grains fins.

Les fréquences de 0,25-0,5-1 MHz pour les aciers coulés, bronze, matériaux à gros grains.

3.11. Fluorescence

La Fluorescence est la propriété d'un produit capable d'émettre de la lumière sous un rayonnement de faible longueur d'onde (notamment les rayons ultraviolets).

Principe

1° on enduit la pièce à contrôler d'un liquide fluorescent (sulfure de zinc).

2° essuyer la pièce.

3°on éclaire la pièce avec une source de lumière filtrée de façon à ne laisser projeter que les rayons ultraviolets. Toutes les parties resteront noires, sauf : les fentes, les porositès, etc., qui s'éclaireront et l'on pourra les photographier, grâce au liquide fluorescent qui se sera infiltré.

3.11.1. Emploi

Pour tous les défauts de surface, ou qui atteignent la surface : trempe, laminage emboutissage, etc.

Les défauts internes entourés de métal sain ne pourront pas être détectés.

3.12. Macrographie

Examen de la structure.

Echelle des grandeurs le millimètre.

Généralités

La macrographie est un moyen simple et industriel, susceptible de fournir des indications sur les défauts des métaux et sur leur structure interne. On ne l'utilise généralement que pour les aciers.

Sa technique simple peut être employée dans les ateliers.

Principe

Observation à l'œil nu ou à la loupe d'une surface ou d'un ensemble poli et attaqué par un réactif.

3.12.1. Polissage

La surface à observer est soigneusement usinée, sans écrouissage, puis polie à la toile abrasive fine de façon à obtenir une surface n'ayant aucune trace de rayures.

La pièce est débarrassée de tout corps gras par un lavage à l' éther.

3.12.2. Attaque lente

La pièce est plongée dans le réactif, généralement de l'acide sulfurique diluè à 20%.

Il faut de tremps en temps brosser la surface attaquée dans un courant d'eau pour la débarrasser des dépôts adhérents.

L'opération dure quelques heures dans le bain froid.

L'opération est d'environ une demi-heure si le bain est porté à l'ébullition.

3.12.3. attaque rapide

La pièce est badigeonnée à l'aide d'un pinceau du réactif suivant :

Iode ……..10gr

Iodure de potassium……..20gr

Eau……..100gr

La durée de l'attaque varie de quelques secondes à quelques minutes.

3.12.4. Attaque par impression

Détection de soufre, procède Baumann. Ce procède consiste à tremper un papier photographique au bromure d'argent dans une solution d'acide sulfurique à 3%.

On applique la surface polie de la pièce sur le papier durant une minute environ en évitant les glissements et les bulles d'air.

L'épreuve est ensuite lavée à l'eau 10 mn, puis trempée dans un bain de triosulfate de sodium à 20% pendant 10 mn ce qui dissout l'excès de bromure, puis lavée à l'eau pendant deux heurs.

Les taches foncées ainsi formées indiquent la présence de soufre.

3.12.5. Procès – verbal

Déceler les inegalitès, les défauts d'homogénéité d'un lingot (scories, retassures, soufflures).

Présence d'éléments néfastes (soufre etc.…)

Connaître le mode de fabrication d'après l'orientation des fibres métalliques ((frogeage, matriçage, laminage FIGURE : 3.29),

Les causes de rupture.

L'examen d'une soudure.

3.13. Micrographie

Examen de la structure (FIGURE : 3.30.)

Echelle des grandeurs, le micron.

Généralités

La micrographie met en évidence la structure de l'alliage métallique, ce qui permet de déceler :

- Le nombre de leurs constituants, leurs formes, leurs répartitions, leur dimension ;
- - les défauts du métal ou les inclusions qu'il renferme lorsqu'ils sont présents à l'échelle microscopique, porosités, fissures, intercristallines, silicates, sulfures, oxydes, etc.. ;
- L'hétérogénéité ou l'homogénéité de la structure ;
- L'efficacité des traitements thermiques.

Principe

Observation à l'aide d'un microscope métallographique avec des grossissements qui atteignent couramment 1000,la surface de l'échantillon, polie puis attaquée par des réactifs choisis pour différencier les constituants.

3.13.1. Polissage

La préparation des –échantillons consiste à réaliser des sections planes et convenablement polies, ne présentant aucune rayure susceptible de gêner l'examen.

A polissage mécanique (procède classique)

Les sections dressées, soit à la meule ou à la lime, sont polies avec du papier abrasif de plus en plus fin, en changeant le sens du polissage de 90°

On continue le polissage avec une meule de drap ou de feutre, arrosée d'une poutre d'alumine en suspension dans l'eau.

Après le polissage, l'échantillon est soigneusement lavé à l'eau puis à l'alcool et sèche.

B) polissage électrolytique

Les laboratoires utilisent des dispositifs de polissage électrolytiques plus rapides et aussi plus précis que le procédé classique.

4 .1.Structure cristalline (FIGURE : 4.1)

4.1.1. Les atomes

En se solidifiant ,les métaux sont formé par une masse de petits cristaux constitués par des atomes. Ces atomes sont toujours disposés de façon régulière dans les cristaux pour former des solides géométriques parfaits. Lorsque les atomes ne sont pas distribués régulièrement, on a **une substance amorphe** non cristalline.

4.1.2. La maille :

Les atomes de fer sont disposés selon deux systèmes cubique :

1. Système cubique centré pour le fer alpha et delta. L'arête mesure 0 ,29 millième de micron.

Il faudrait, pour former une longueur de 1 mm , environ 3 000 000 d'arêtes.

2. Système cubique à faces centrées pour le fer gamma. L'arête mesure 0,36 millième de micron.

4.1.3. Le cristal :

Les mailles formées s'assemblent entre elles et constituent ainsi un réseau, appelé cristal.

4.1.4Les dendrites :

La juxtaposition enchevêtrée des cristaux constitue les dendrites.

- **Principe :**

L'axe principal se forme le premier, puis apparaissent à angles droits des axes secondaires plus courts et à angles droits de ceux-ci des axes encore plus courts.

Ces divers axes s'allongent et grossissent progressivement.

Leur croissance se trouve limitée aux surfaces de rencontre des cristaux issus de centres voisins.

Le nombre de centres de solidification est d'autant plus grand que la solidification est plus rapide.

Une solidification rapide produit donc de petits dendrites et inversement une solidification lente conduit à de gros dendrites.

4.1.5. Les grains :

Chaque axe principal ou centre de solidification a engendré un grain.Ces grains sont aussi appelés macro cristaux.

Le métal solide est alors constitué par un assemblage compact de grains n'ayant aucune forme extérieure géométrique régulière et dont chacun correspond à une orientation cristalline constante dans tout son intérieur.

Remarque

Les rayons X ou le microscope électronique permettent de connaître la structure cristalline.

4.2. Fusion et solidification d'un métal pur (Figure : 4.2)

- **Principe :**

Chauffons un échantillon de métal pur par un apport régulier de chaleur, puis relevons l'élévation de température de cet échantillon sur un diagramme,

Avec en abscisse les temps de chauffage et en ordonnée les températures.

1. La température s'élève régulièrement.

2. La température se fixe dés qu'apparaît une goutte de liquide **et reste constante tant qu'on est en présence de liquide et solide.**

Cette température constante est le point de fusion du métal à la pression de l'expérience.

Remarque

La chaleur fournie au métal pendant la fusion sert uniquement à la transformation du solide en liquide sans élévation de température.

3.La température continuera de s'élever régulièrement quand toute la masse sera parvenue à l'état liquide.

Inversement, si nous laissons refroidir le liquide :

1. La température s'abaisse régulièrement.

2. La température reste constante à l'apparition de solide dans le liquide (voir cristallisation).

Remarque

La chaleur de solidification est égale à la chaleur de fusion.

3.La température continuera de diminuer quand tout la masse sera parvenue à l' état solide.

4.2.1. Transformations allotropiques :

L'étude du refroidissement de certaines métaux, fer, nickel, étain, etc., montre que la courbe présente, en plus du palier de solidification, **un ou plusieurs autres palier à l'état solide du métal.**

Le palier correspond à une transformation du métal, caractérisée essentiellement par une modification profonde de sa structure cristalline, **désignée par transformation allotropique.**

La température de transformation, comme pour les changements d'état solide en liquide ou liquide en solide, s'effectue à température constante.

Exemple :

Le fer en le chauffant (AC) subit une première transformation vers 906˚ C.

Le fer alpha se transforme en fer gamma et à 1401˚C une deuxième transformation, le fer gamma en fer delta (fig.4-2).

Les deux transformation sont inversées si on laisse refroidir (Ar) le fer en fusion.

4.3. Fusion et solidification d'alliages (FIG : 4.3)

Généralités :

Le phénomène de fusion et de solidification pour un seul élément, métal pur, marque une température constante appelée **point de fusion.**

Pour le mélange de métaux avec d autres éléments. Métaux ou métalloïdes, l'alliage commence à fondre à une certaine température et passe entièrement à l'état liquide à une température plus élevée ou inversement de l'état liquide à l'état solide à une température plus basse.

Entre ces deux points de température l'alliage forme une masse pâteuse constituée de métal liquide et de cristaux solides dont les proportions varient en fonction de la température.

4.3.1. Alliage donnant une solution solide (FIG : 4.3)

- **Principe :**

Sur un diagramme portons en abscisse de 0 à 100% de l'élément A et de 100% à 0 pour l'élément B, en ordonnée les températures, puis relevons tous les points de début et de fin de fusion d'alliage des deux éléments A et B suivant leur pourcentage.

En joignant tous les points obtenus, nous tracerons une courbe de début de fusion appelée « solidus» et une autre courbe de fin de fusion appelée «liquidus».

Remarque :

Les cristaux obtenus de cet alliage contiennent à la fois les deux éléments A etB.

Il est impossible de différencier les deux éléments dans les cristaux.

Exemple :L'eau ne se distingue pas du sel dans une solution salée.

L'alliage est à l'état de solution solide.

Les deux métaux restent parfaitement **miscibles à l'état solide.**

Alliages :

Cuivre-nickel, cuivre-platine, fer-molybdène, antimoine-or, etc.

4.3.2. Alliage donnant lieu à la formation d'un mélange eutectique (figure : 4.4) :

- **Principe :**

Sur un diagramme avec en abscisse de 0 à 100% de l'élément X et 100% à 0 pour l'élément Y , relevons en ordonnée les températures des points de fusion des éléments X et Y ainsi que tous les points de début et de fin de fusion des alliages formés par X-Y suivant leur pourcentage.

4.3.2.1. Point eutectique

En joignant tous les point obtenus, nous constations que les deux courbes de liquides se rejoignent en un point C appelé :

- **Point eutectique :**

Ce mot dérive du grec, et signifie « fondant bien ».

La température de l'alliage eutectique est constante pour le passage de l'état liquide ou inversement du liquide au solide ,**elle est inférieure au point de fusion**

Remarque

La masse, appelée mélange eutectique, est constituée par un enchevêtrement de cristaux très petits de chacun des deux éléments.

4.3.2.2. Alliages inférieurs ou supérieurs à l'eutectique

Le mélange solide obtenu n'est pas homogène, les deux métaux ne sont pas miscibles à l'état solide.

Dans la partie inférieure, il y aura des cristaux de Y et un mélange eutectique.

Dans la partie supérieure, il yaura des cristaux dex et mélange eutectique.

Alliages :

Plomb- étain, plomb-cadmium, plomb-antimoine, étain-cadmium, béryllium-silicium, etc.

4.4. Diagramme fer-carbone (FUG : 4.5)

❖ **Principe :**

Le diagramme est formé en abscisse :

-à gauche **100% de ferrite** (le fer pur) ;

-à droite **100% de cémente**(le carbure de fer),combinaison chimique de fer et de carbone, dont la molécule est Fe_3C ;

-en ordonnée **la température.**

Remarque

Pratiquement, il est important de connaître la teneur en carbone d'un tel alliage, c'est la raison de l'introduction de l'échelle du carbone.

Poids atomique du fer 55 ,84

Poids atomique du carbone 12

Poids atomique de la molécule de fe_3c= 55,85*3+12=179.52 Pour 12 de carbone.

Pour 100%de cémentite pur il ya : 12/179.52*100=6.67% de carbone.

4.4.1. Etude du diagramme :

Pour étudier d'une manière logique le diagramme fer-carbone, il est nécessaire de distinguer :

1. Nous avons affaire à un système binaire avec l'existence de deux diagrammes d'équilibre suivant l'influence de la vitesse de refroidissement :

A) Diagramme métastable (trairs pleins)

Refroidissement assez rapide le carbone se trouve à l'état de carbure de fer ou cémentite.
fontes blanches.

(L'élément tel que le Mn ou le Cr favorisent la formation de la cémentite)

B) Diagramme stable (en pointillés)

Refroidissement lent, le carbone se trouve à l'état de graphite l'alliage ne subit aucune modification sous l'action de la chaleur .**fonte grise**

(Les éléments tels que le Si, Al, jouent le rôle de catalyseurs, ils favorisent la formation d'un équilibre stable)

1. Une zone liquide, au- dessus du liquidus.
2. Une zone solide, au- dessous du solidus.
3. Deux zones de transformation de liquide en solide ou de solide en liquide, selon le sens de variation de la température (état pâteux).

1. **Point eutectique** **C**=lèdèburite.
   Point de formation bien déterminé pour :
   4,3%de carbone à 1145°C.
   Cette température constante est inférieure au point de fusion du métal le plus fusible.
   Passage de l'état liquide homogène au solide à deux composants distincts :
   Austénite + cémentite
2. **Point eutictoide** (perlite).
   Même propriété que l'eutectique mais se forme à partir de corps solidifiés à :
   721° C pour 0.83% de carbone.
   L'austénite, dont le carbone est intimement mélangé au fer γ à l'intérieur même du cristal, se transforme par perte de chaleur en un agrégat.
   Chaque grain sera composé par juxtaposition de réseaux de cristaux de fer α et de réseaux de carbure de fer (cémentite).
   Transformation allotropiques de fer γ en fer α à tempèrature constante.
3. 768° C point de curie. Perte du magnétisme du fer α
4. 210° Capette du magnétisme de la cémentite.

5. Généralités

Les traitements thermiques des métaux et des alliages ont pour but de modifier les propriétés de ces corps , uniquement par variation de température.

Les catégories de traitement thermiques sont :

-La trempe

-Le revenu

-les recuits

Remarque

La détermination des traitements thermiques à imposer à un métal (aliage Fe-C parex) est basée sur :

- **Le diagramme fer-carbone(FIG :5.1)**

Observation des points critiques du métal

Les températures de chauffe

-Pour le déplacement de AC1-AC3- ACCm des aciers alliés. Ternir compte de l'influence des éléments d'alliages ajoutés.

- **La courbe T T T(FIG :5.3)**

Etude du refroidissement

Les températures de refroidissement

-Pour le déplacement des courbes **T T T** des aciers alliés.à l'acier au carbone.

5.1. La trempe (théorie) :

- **Généralités**

La trempe est une opération qui consiste **à refroidir brusquement** un produit métallurgique porté à une température bien définie, **afin d'en modifier les propriétés.**

- **Température de chauffe**

Le diagramme fer-carbone avec la courbe de trempe nous indique les températures de chauffe des aciers

-eutectoïdes

-hypoeutectoïdes

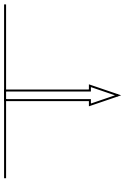
-hypereutectoïdes

1. **Température de chauffe pour les aciers eutectoïdes**

L'élévation de la température produit une modification de la nature des constituants.

Structure d'un acier eutecoïde avant le chauffage.

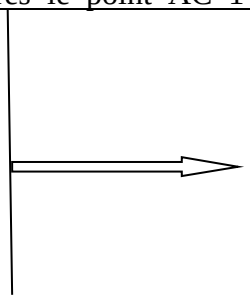
Des grains
De perlite
Magnétique



- Ferrite ou fer pur cristallisé selon la variété (Alpha)
- Cémentite ou carbure de fer. Molécules formée de 3 atomes de fer et 1 atome de carbone

Structure de chauffe après le point AC 1 + 50˚

- Des graines
- D'austénite
- Amagnétique



- Solution à l'état solide de carbone dans le fer gamma
- Le carbone est mélangé au fer L'intérieur même du cristal

2. Température de chauffe pour les aciers hypoeuctoïdes

Augmentation De la température vers la gauche, pour obtenir toute la structure austénitique. Ac3+50˚.

Remarque

Pour une température inférieure à Ac3, la ferrite non transformée en austénite subsisterait après la trempe, d'où diminution de la dureté.

Important

Le minimum de carbone pour qu'un acier prenne une dureté suffisante à la trempe trouve à 0.4% environ.

3. Température de chauffe pour les aciers hypereutectoïdes

Même température que pour les aciers eutectoïdes.

Remarque

La cémentite non transformée subsiste après la trempe, mais sa dureté étant plus grande que la martensite, l'influence sur la dureté sera bénéfique.

- **Températures de refroidissements :**

Généralités :

Les structures et la dureté obtenues avec le refroidissement sont fonction de la vitesse de refroidissement.

❖ **Diagramme T T T :**

(Temps, température, transformation)

Le diagramme donne les structures ou les phases de transformation que subit l'austénite refroidie à des températures différentes, en dessous de 721˚, en fonction du temps.

Pour observer les réaction, 5 éprouvette d'acier eutectoïde sont chauffées à la température de trempe, 50˚ au-dessus de Ac1, puis refroidies à des températures différentes .

- **Interprétation du diagramme T T T (FIGURE : 5.4)**

A-Structures obtenues par le refroidissement :

Superposons au diagramme T T T diverses courbes de refroidissement continu, eau, huile, air ou dans un four.

On admet qu'aux points où la courbe de refroidissement continu rencontre la courbe en S, l'échantillon ou la pièce se trouve dans le même état que s'il avait été

brusquement refroidi à la température ou commence la transformation, perlite ou bainite.

Remarque

La vitesse critique de trempe correspond à la courbe de refroidissement tangente à la courbe en S dans sa partie supérieure.

B-Trempe étagée martensitique :

La trempe est effectuée dans un bain chaud, d'une température aussi voisine de Ms, et maintenue un certain temps pour être suivie d'un refroidissement à l'air.

Remarque

Le bain de trempe doit être capable d'absorber la chaleur assez rapidement.

C-Trempe étagée bainitique :

La pièce est maintenue un certain temps dans un bain chaud d'une température comprise entre Ms et 450° puis refroidie à l'air.

Remarque

La trempe bainitique donne aux pièces une dureté de 42 à 55 HRC , mais améliore les qualités de résistance et d'allongement.

D-choix du milieu de refroidissement :

Le meilleur choix sera la trempe à l'huile.

5.1.La trempe(pratique) :(FIGURE :5.5)

La pleine réussite de la trempe dépend des conditions suivantes :

-Observation exacte des température de trempe et du moyen de refroidissement, prescrites par les aciéries.

-Utilisation de four permettant un chauffage uniforme, ainsi que des appareils très précis pour le contrôle de la température.

-Il est avantageux de protéger les alésages et autres parties ne devant pas prendre la trempe, par une couche d'argile , d'amiante ou de pâte d'isolation du commerce.

❖ **Chauffage :**

Pour amener les pièces à la température de trempe, on procède de la façon suivant :

1.Une préchauffe

Les pièces sont chauffées lentement et progressivement jusqu'à :

600à 650˚pour les aciers au carbone ; 800˚ pour les aciers rapides.

Remarque

Ne jamais mettre les pièces froides dans un four très chaud.

2. La température de trempe

Les pièces préchauffées sont placées dans un four chauffé à la température de trempe.

Remarque

Il faut obtenir rapidement la température de trempe.

3. Maintien de la température de trempe

Pour avoir une répartition régulière de la température , on compte normalement pour une épaisseur de 10 mm de matière une durée de :

5 minutes pour les aciers faiblement alliés ,10min pour les aciers fortement alliés.

Déformation des pièces :

Les pièces sont disposées dans le four de manière à éviter toute déformation , souvent provoquée par leur propre poids.

Ces déformations subsisteront après le refroidissement et pourront même amplifier au Cours du refroidissement des pièces.

Remarque

Attention au transport des pièces, du four au bain de refroidissement.

❖ **Grossissement du grain (fig. :5.6) :**

Un chauffage trop élevé ou laissé trop longtemps à la température de trempe, provoque un grossissement du grain, et par ce fait rend **l'acier cassant.**

Remarque

La température maximale est donnée pour les grandes pièces ou pour la trempe à l'huile des acier au carbone. La température minimum pour les petites pièces ou pour la trempe à l'eau des aciers au carbone.

❖ **Décarburation :**

A moins qu'on ne dispose de fours à atmosphère contrôlée ou de bains de sels, il est recommandé d'emballer les pièces afin de les protéger contre l'oxydation et la décarburation.

Le charbon de bois en grain préparé spécialement ou le coke calciné et pilé donnent de bons résultats.

❖ **Refroidissement :**

La vitesse de refroidissement dépend d'un grand nombre de facteurs :

1. Influence du bain de trempe :

La nature du bain de trempe a une action sur la vitesse de refroidissement.

-Pour la trempe vive, l'eau. Une addition de 10% de sel de cuisine augmente encore l'effet de refroidissement.

-Pour la trempe douce, l'huile et l'air soufflé.

-Pour la trempe au bain chaud, un bain de sel.

2. Température des bains de trempe,

20˚à 30˚ pour l'eau. Dés que la température de l'eau dépasse 30˚, la trempe devient irrégulière.

50˚ environ, pour l'huile. Avec cette température, on obtient un meilleur effet de refroidissement.

Remarque

Un bac de trempe doit être conçu de façon à assure le maintien à température constante du liquide, surtout s'il s'agit d'un traitement thermique exécuté en série.

Ce résultat s'obtient :

1. En donnant au bac la plus grande capacité possible.
2. En prévoyant un système de réfrigération.
3. Un renouvellement du liquide, s'il s'agit de l'eau.

3. Agitation du bain ou de la pièce

L'agitation du bain par un dispositif convenable ou de la pièce dans le bain favorise les échange de chaleur, on assure une répartition identique du liquide sur toute la surface de la pièce.

4. Le volume du bain de trempe

L'augmentation du volume du bain limite évidemment l'élévation de sa température , donc favorise le refroidissement.

4. Présentation des pièces au bain de trempe

A la sortie du , on plonge les pièces **immédiatement** dans le bain suivant les conditions :

-Les pièces longues seront trempées verticalement ;

-Les pièces à sections irrégulières seront immergées de façon à présenter la plus grosse partie au contact du liquide.

Forme des pièces

Les pièces qui seront trempées ne doivent pas avoir des différences de section trop brusques, ni des traces de tournage, celle-ci comme également les marques de poinçons provoquant très souvent de fortes tensions qui peuvent être la cause de fissures au moment de la trempe.

Il faut éviter autant que possible les différences de section trop brusques et les remplacer par un léger arrondi.

Ces défauts d'usinage sont cause de ruptures prématurées d'outils soumis aux chocs ou vibration.

Surépaisseurs

Après forgeage et recuit, la surface de l'acier est recouverte d'un couche de calamine rugueuse, présentant même une certaine décarburation.

Afin d'obtenir une surface parfaitement saine et présentant la pleine dureté, ainsi que pour éviter les fissures de trempe, il faut usiner la pièce sur toutes ses faces.

Il est nécessaire, lors de la commande, de prévoir les surplus de dimension pour l'usinage, comme indiqué ci-après , environ 5% des mesures finies :

Mesures finies Φ mm	Surépaisseurs en général mm	Surépaisseurs pour acier de nitruration
6-16	2	3
17-25	3	4
26-40	3	5
14-63	4	6
64-80	5	7
81-100	6	10
101-125	7	7
126-160	9	15
161-200	11	18
201-250	13	21
251-315	16	25
316-400	20	-
401-500	25	-

Modification des caractéristiques mécaniques du métal

Un tel traitement modifie très sensiblement les caractéristiques suivantes :

-la résistance à la traction a augmenté

-la contrainte de la limite élastique a augmenté

-la dureté H R C a augmenté

-la résistance à l'usure a augmenté

-l'allongement a diminué

-la résilience a diminué

5.2.Le revenu (théorie) (FIGURE :5.7)

Après la trempe, l'acier est extrêmement dur et fragile, **il ne pourrait en aucun cas servir aux emplois aux- quels il était destiné.**

But

Le but du revenu est de diminuer les effets de la trempe , et d'atténuer ou de faire disparaître les tensions internes par les traitements thermique suivants :

-un chauffage entre 100 et 650˚

-maintenir cette température

-un refroidissement, en général à l'air

Nouvelle structure : LA SORBITE

Pendant le chauffage la martensite, solution solide de carbone dans le fer alpha, est transformation en un constituant nouveau, **la sorbite,** agrégat de fer et de carbure de fer (Cémentite) analogue à la troostite.

Le grain de sorbite est constitué de lamelles très minces de carbure de fer, disposées entre les couche très fines de fer.

La sorbite est presque aussi dure que la martensite mais beaucoup moins fragile.

Diminution de la dureté avec l'augmentation de la température

Un acier trempé qu'on chauffe à moins de 150˚ ne subit aucune diminution sensible de sa dureté.

Si l'on propose d'augmenter la ténacité d'un manière plus prononcée et en conséquence d'obtenir une dureté plus faible, on déterminera la température adéquate en se servant **du diagramme de revenu correspondant à l'acier dont il s'agit.**

5.2 Le revenu (pratique) :

Vu la nécessité d'un contrôle rigoureux de la température , l'emploi de fours de revenu spéciaux est à recommander.

Chauffage

La chauffage se fera lentement jusqu'à la température de revenu.

On se sert avantageusement pour le revenu :

-soit d'un four à circulation d'air

-soit d'un liquide

- Bain d'huile
- Bain de sels
- Bain d'eau

Durée de revenu

Suivant les expériences, le plein effet du revenu ne peut être réalisé que

Si la durée a été suffisante.

Elle sera d'une demi-heure et jusqu'à deux heures pour 10 mm de matière.

Pour les températures basses, on choisira les durées de revenu plus longues que pour les températures hautes.

Refroidissement

Le refroidissement est exécuté généralement à l'air.

Un refroidissement trop rapide peut provoquer de nouvelles contraintes.

Revenu à la couleur

A défaut d'appareils de mesure, on peut juger de la température de revenu d'une pièce d'après la couleur que prend sa surface préalablement blanchie à la toile abrasive.

Remarque

Pour les aciers fortement alliés, il faut tenir compte du fait que les couleurs de revenu apparaissent à des températures supérieures, observées pour les autres aciers.

Cette méthode empirique, qui est fonction de l'épaisseur de la couche d'oxyde , de l'éclairage de l'atelier et de l'œil de l'opérateur ne peut donner de résultats précis et constants.

5.3 Le traitement thermique de l'acier rapide (FIGURE : 5.8)

Important

Le traitement thermique correct des outils en acier rapide est aussi important que l'élaboration de l'acier lui-même.

Analyse

L'analyse chimique montre qu'il renferment, indépendamment du fer, les éléments suivants :

Carbone : Forme des carbures, augmente la résistance à l'usure, détermine la dureté de la masse de fond (matrice).

Tungstène ou molybdène : Forme des carbures spéciaux très durs, améliore la dureté à chaud, la résistance au revenu et à chaud de la matrice.

Vanadium : Forme des carbure très durs, augmente la résistance à l'usure à chaud, la résistance au revenu et la dureté à chaud de la masse de fond.

Chrome : assure la pénétration de trempe et forme des carbures facilement solubles.

Cobalt : ne forme pas de carbures mais reste dissous dans la masse, augmente la dureté à chaud et la résistance au revenu de la matrice.

5.3.1. Trempe (Températures très élevées)

Pour que la martensite atteigne par la trempe pleine dureté, il faut que l'austénite absorbe dans la zone de la température de trempe, suffisamment de carbone, de tungstène, de molybdène et de vanadium.

La dissolution des carbures précipite les pourcentages d'alliages nécessaires.

Les quantités requises des carbures ne pouvant être dissoutes qu'à des températures très élevées, 1180 à 1320˚(suivant la masse de l'acier).

Structure :

La structure de l'acier rapide trempé se compose d'environ 70% de martensite, 20% d'austénite résiduelle et 10% de carbures non dissous.

Dureté (après la trempe)

La dureté après trempe se situe à peu prés à 61-63 H R C .

5.3.2. Revenu :

Important

On obtient également, par le revenu, pour cette catégories d'aciers une certaine détente, mais le but principal de l'opération n'est **pas une diminution, mais une augmentation de la dureté et de la résistance à l'usure.**

Austénite résiduelle

On trouve toujours, dans ces catégories d'aciers à l'état trempé, la présence, à côté de la martensite, de l'austénite résiduelle, en quantité variant selon la température de trempe et le mode de refroidissement employé.

Par le chauffage du revenu, 580˚ à 600˚, on arrive à détendre la martensite,

et lors du refroidissement qui suit cette opération, une partie de l'austénite résiduelle se transforme à son tour en martensite.

Double revenu :

Comme cette martensite nouvellement constituée n'a pas encore été soumise au revenu, elle est très fragile, il est donc nécessaire de procéder à un deuxième revenu, dont la température sera environ la même.

Augmentation de la dureté :

le deuxième revenu sert avant tout à détendre la nouvelle martensite, mais il opère en même temps une nouvelle transformation en martensite d'une petite partie du solde d'austénite résiduelle.

Remarque

La dureté étant fonction de la quantité de martensite, on comprend donc l'augmentation de la dureté.

Structure :

La structure d'un acier rapide correctement traité se compose de martensite revenue, de carbure spéciaux (ledeburitiques) et de moins de 8% d'austénite résiduelle.

Le revenu améliore aussi la ténacité

5.3.3. Nitruration (au bain) :

Le traitement confère aux surfaces une résistance à l'usure particulièrement élevée.

La dureté de coupe des outils peut être augmentée de 10% et même avantage .

Remarques

L'avantage de la nitruration ne se manifestera pleinement que si les outils en acier rapide sont nitrurés après avoir été trempés, revenus et finis à la meule.

5.4. Les recuits (FIGURE : 5.9)

Généralités :

Tout pièce compliquée , ayant obtenu sa forme définitive par un façonnage à chaud , nécessite avant l'usinage un recuit .

En général , on ne tient pas assez compte que le fraisage ,le tournage ou lerobotage provoquent également des tensions dans l'acier . Ces tensions peuvent être à l'origine de déformations et de fissures au moment de la trempe .

Décarburation :

La décarburation en cours de chauffage s'évite , si l'on empêche tout contact entre l'acier et l'oxygène , **par une atmosphère neutre** , ou en enfouissant les pièces dans **des caisses remplier de copeaux de fonte** .

5.4.1.Recuit de normalisation N :

Les acier de moins de 1% de carbone (acier de construction) sont le plus souvent soumis au recuit de normalisation .

Température de chauffage :

L'opération consiste à chauffer l'acier juste au-dessus du point Ac_3, transformation de la structure en austénite.

L'acier est maintenu à cette température juste quelques minute .

Refroidissement :

Le refroidissement s'effectue à l'air libre .

5.4.2. Recuit doux G :

Avec le recuit doux ,on transforme les plaques de cémentite dans le perlite et le réseau de cémentite en excès ,de telle façon qu'il adopte la forme de boule appelée **cémentite sphéroidisée** .

Remarque

Le recuit doux ordinaire ne se pratique pas pour les acier de moins de 0,4 % de carbone .

But

Bonne structure pour l'usinage et très favorable pour la trempe .

L'acier est plus doux et plus malléable perte des tension internes , occasionnées par le travail à chaud .

Recuit doux de l'acier hypoeutectoide

Température de chauffage

L'acier est chauffé à une température à peine au-dessus du point Ac1,et laissé oscille autour de ce point pendent une durée de trois à quatre heures .

Refroidissement

Laisser refroidir lentement dans le four , à une vitesse de 20 à 30° par heure , jusqu'à 600° environ ,puis continuer le refroidissement à l'air libre .

Recuit doux de l'acier hypereutectoide

Il importe non seulement de transformer la perlite-cémentite en forme de boule , mais de sphéroidiser l'excèdent de cémentite .

Température de chauffage

La température du recuit est liée avec la teneur en carbone , donc augmentation de carbone = augmentation de température .

Le maintien de la température est de deux à quatre heures .

Refroidissement

Laisser refroidir lentement dans le four ,à la vitesse de 20°par heure , jusqu'à la température de 600° .

Le refroidissement peut se poursuivre à l'air libre sans inconvénient .

5.4.3. Recuit de stabilisation ou recuit intermédiaire

Ce recuit n'a pas pour but de modifier la structure de l'acier ni d'en atténuer la dureté .

Température de chauffage

L'acier est chauffé à une température de 550 à 650° pendent une demi-heure à deux heure .

Refroidissement

On laissera refroidir lentement dans le four même .

But

Eliminer les tensions internes après le soudage ,ou celles d'un travail préliminaire à chaud ou à froid .

5.5.les durcissements des surface

But

Dans de nombreux cas ,une pièce finie doit avoir non seulement une dureté égale à l'acier trempé ,**mais une bonne résilience** .

Elle doit être de composition **hétérogène** .

-L'intérieur, en acier doux, assure la résilience désirée .

-L'extérieur, en acier dur, permet d'obtenir la dureté recherchée .

Les méthodes le plus importantes de durcissement superficiel pour les pièces ayant leur forme définitive sont :

- la cèmentation

- la nitruration

- la trempe superficielle (induction ou à la flamme)

5.5.1. Cémentation.

La cémentation est un traitement qui permet, sous l'effet de la chaleur, **d'introduire du carbone à l'acier doux** et former une couche extérieure plus ou moins profonde, de 0 ,2 à plusieurs millimètres , apte à prendre la trempe.

La cémentation comporte donc deux phases successives :

1. Cémentation proprement dite (Carburation)

2. Traitements thermiques (trempe, revenu)

1. Cémentation proprement dite

Principe

Pour enrichir en carbone la surface de la pièce , on dispose celle-ci au sein d'un milieu , **appelé cément** , susceptible de lui céder du carbone .

Le tout porté à une certaine température.

Remarque

Quel que soit l'état physique du cément, le carbone est apporté à l'acier par l'intermédiaire de gaz carboniques qui,au contact du fer, se décomposent en libérant le carbone qui se dissout dans le métal.

La température, 815 à 930° environ.

Le diagramme d'équilibre des alliages fer-carbone montre que la solubilité du carbone, pratiquement nulle dans le fer (alpha) devient relativement grande dans le fer (gamma) passant de 0,83% pour une température de 721° à 1,7 % pour une température de 1145°.

Remarque

Il est donc nécessaire de chauffer au-dessus du point de transformation Ac3 de l'acier à cémenter pour permettre **la dissolution du carbone par le fer (gamma).**

Epaisseur de la couche cémentée :

0,2 à plusieurs millimètres.

L'épaisseur a un rapport avec la fonction, mais au maximum1/10 de l'épaisseur de la pièce.

Pour des pièces subissant une usure, l'épaisseur sera plus grande que pour des pièces supportant des chocs.

La profondeur de pénétration et la teneur en carbone dépendent :

-de la température

-du cément utilisé

-de la durée de l'opération

La teneur en carbone (FIGURE 5 :10)

La couche cémentée présente dans son épaisseur toutes les nuances d'aciers correspondant à la variation de la teneur en carbone en surface, de 0,8%à 1%,à la teneur en carbone de l'acier de cémentation, 0,2%.

Epaisseur utile de cémentation :

Les deux tiers de la couche cémentée.

L'épaisseur utile de la couche recarburée est comptée à partir d'une teneur voisine de 0,4%de carbone.

Vitesse de pénétration du carbone : (FIGURE : 5, 11)

La couche cémentée ne croit pas de façon linéaire avec le temps, mais rapidement au début puis de plus en plus lentement avec l'augmentation de la durée de la carburation.

Protection des parties ne devant pas être cémentées :

On peut protéger les parties par les moyens suivants :

-cuivrage électrolytique

-une surépaisseur de matière qu'on aura soin d'enlever après la cémentation, c'est-à- dire avant la trempe.

Les céments

Les bon cément doit avoir :

-un effet constant de carburation

-une composition parfaitement définie

-le pouvoir d'être utilisé un grand nombre de fois

Pratique des opérations (FIGURE :5, 12) :

Les pièces doivent prèsenter, avant la cémentation, des surfaces métalliques absolument propres et exemptes de graisse.

5.5.1.1.1. Cémentation solide A :

1-les pièces sont disposées dans de 6 boîtes de façon à ménager entre elles et les parois une épaisseur de cément de 10 à 20 mm.

Les boîtes sont fermées avec un couvercle et les joints rendus étanches avec de l'argile. On évite ainsi la combustion du cément.

2-les boites sont disposées dans un four et chauffées à la température de cémentation pendant le temps nécessaire.

Remarque

Les boites sont choisies de dimensions aussi petites que possible de façon à permettre une répartition uniforme et rapide de la température de chauffe et de refroidissement.

Dans le cas de grosses pièces, on emploie des boîtes individuelles.

3- contrôle :

Les éprouvettes de même acier que les pièces pénètrent dans les boîtes par une ouverture, permettant de contrôler la cémentation au cours de l'opération.

Elles sont probablement sciées à moitié et sont cassées après cémentation et trempe.

4-généralement on laisse les pièces se refroidir dans les caisses, le tout à l'air.

L'extraction des pièces de leurs boîtes, lorsqu'elles sont encore à haute température, provoque par combustion une perte importante de cément et ne permet pas d'obtenir un traitement thermique précis.

5.5.1.2. cémentation liquide B :

Lorsque le bain de sels métalliques est fondu à la température de cémentation, on immerge les pièces fixées par un fil de fer.

Les pièces peuvent être aussi disposées en vrac dans des paniers en tôle perforée.

Avantages :

La chauffe est plus régulière ,la température du bain est contrôlée par une canne pyrométrique.

La décarburation des pièces à la sortie du bain est éliminée par une légère couche de sel sur les surfaces.

La trempe peut être effectuée à la sortie du bain.

Remarque

Les pièces introduites dans le bain doivent être bien sèches, afin d'éviter toute projection de sel.

5.5.1.3. Cémentation gazeuse C :

Les pièces, disposées dans un moufle en acier réfractaire chauffé de l'extérieur, sont entourées d'un mélange gazeux, carburant, bien défini, stable et renouvelé par circulation.

Avenage :

Les conditions de carburation peuvent être réglées à volonté, par un dosage approprié de l'activeur.

Les pièces cémentées restent propres.une cémentation plus rapide.

5.5.1.4. cémentation rapide (FIGURE : 5, 13) :

Le ferrocyanure, vendu sous le nom de plrussiate, est utilisè comme cément brusque lorsqu'on désire obtenir rapidement une couche très dure de quelques 1/100 de mm sur un organe de machine (vis, rondelles, etc.)

Mode opératoire :

on chauffe les pièce au –dessus du point Ac3, puis, par intervalle, on plonge les pièces dans le cément et on les réchauffe pour finalement les tremper dans l'eau.

2. traitement thermiques :

Trempe A :

On refroidit les pièces dans la caisse après la carburation, de façon que l'austénite se transforme complètement en perlite/ferrite.

On les réchauffe ensuite à la température de trempe désirée, pour les plonger dans un réfrigérant.

Remarque

Il est possible d'effectuer des opérations d'usinage avant la trempe.

Trempe BC :

Les pièces sont immédiatement trempées à la fin de la carburation. Suivant les cas, on pourra abaisser la température de trempe Ac3+50° du pourcentage de carbone de la couche cémentée.

Les réfrigérants :

Le refroidissement peut être effectué :

-dans l'eau

-dans l'huile

-au bain chaud avec refroidissement final à l'air.

Remarque

Le choix du cément et le moyen de refroidissement sont en rapport avec l'acier employé.

Revenu :

Les pièces cémentées sont habituellement soumises à un traitement de revenu entre :

150° et 180°pour les aciers non alliés

160°et 210° pour les aciers alliés

Remarque

Un revenu améliore la rectification et diminue la sensibilité des pièces cémentées aux fissures de meulage.

5.5.2. Nitruration

Le but de la nitruration est de durcir superficiellement l'acier , par l'action de l'azote.

Principe

La nitruration consiste à soumettre l'acier, chauffé à certaine température, à l'action d'un courant d'ammoniac gazeux.

Le gaz ammoniac (NH3) réagit avec la surface de l'acier (catalyseur) pour former de l'azote naissant, qui pénètre dans la surface de l'acier alpha et l'hydrogène (H) est libère.

Température : 500 à 525° environ.

Le point eutectoïde de l'alliage fer/azote se trouve, pour un taux d'azote de 2,3% à un température de 590°. Aux températures plus élevées apparaissent des combinaisons Fe/N appelées nitrures, très fragiles et par conséquent absolument pas souhaitables.

Les températures sont donc situées au- dessous de cette température critique.

Dureté HVentre 1000-1200

L'influence de l'azote sur les propriétés mécaniques des aciers ordinaires est relativement peu marquée.

Cet accroissement de dureté ne peut être attribué qu'aux aciers alliés Cr Al Mo, par la formation de nitrures AIN ou CrN, qui, insolubles dans le fer alpha, s'insèrent dans le réseau cristallin.

La finesse de cette répartition entraine le blocage de presque tous les plans de glissement, d'où augmentation de la dureté.

Le Mo a le role d'empêcher les fragilités du revenu, particulièrement à craindre aux températures de nitruration.

Remarque

Le déroulement de la nitruration est accompagné d'une augmentation de volume de 2/100 de mm environ.

Fragilités :

Il faut agir avec les plus grandes précautions lors du transport et du stockage des pièces nitrurées.

La moindre choc fait courir le risque de fissure dans la couche nitrurée.

Il ne faut travailler qu'avec des marteaux de bois ou de caoutchouc lors du montage.

Profondeur :

0,8 mm au maximum. Voir diagramme (FIGURE :5. 14)

Durée de l'opération diagramme (FIGURE :5. 14)

Avantages :

- On laisse refroidir les pièces dans le four.
- -la déformation est nulle
- -la couche nitrurée présente une certaine résistance à la corrosion
- -bonne résistance à la fatigue
- -propriétés excellentes de glissement
- -grande résistance à l'usure
- -la couche nitrurée conserve sa dureté jusqu'à 500° environ.
- -amélioration de la résistance à l'usure des outils en acier rapide, nitrurée après la trempe et le revenu.

Pratique des opérations : (FIGURE :5. 14)

Préparation des pièces :

A Ebaucher les pièces

B Traitements thermiques

Trepme à l'huile, 870-900°

Revenu à l'air ,508-650°

Le revenu doit avoir une température supérieure à celle de la nitruration, pour éviter une modification des propriétés mécaniques au cours de l'opération.

C Achèvement de l'usinage :

D nitruration gazeuse :

Les pièces sont nettoyées et dégraissées par un lavage aux ultrasons dans du tri-ou du perchlorèthylène.

Dans une cuve en tôle d'acier fortement allié, au Cr-Ni, résistante à la température et à la nitruration, les pièces sont disposées sur des grilles.

-la cuve est fermée par un couvercle, boulonné avec un joint, pour assurer une étanchéité parfaite.

-les four utilisés sont généralement des fours électriques fortement calorifugés et munis d'un bon dispositif de régulation de la température

-le gaz ammoniac comprimé est amené à l'aide d'une bouteille

-il faut avoir environ 97%de gaz ammoniac dans la cuve avant d'augmenter la température

-après le temps nécessaire, on laisse refroidir jusqu'à 100° environ, avant d'enlever les pièces.

Important :

Il ne faut en aucun cas laisser entrer de l'air ou de l'oxygène pour le refroidissement, il se formait un gaz tonnant.

Nitruration liquide :

L'opération de nitruration peut être aussi effectuée dans bains de sels nitrurants.

E rectification éventuelle

De quelques centièmes de millimètre – rodage

F contrôle de la dureté HV

Remarque

Suivre les indications des fournisseurs pour chaque cas particulier.

Protection

La production de certaines parties des pièces contre la nitruration s'obtient par étamage ou badigeonnage à l'aide d'un pinceau avec pâte formée de suif, de résine, de poudre d'étain et de plomb.

5.6. essais de trempabilité «jominy» (FIGURE : 5. 15)

Généralités

Une éprouvette prélevée dans l'acier à examiner est portée à la température de Trempe, puis refroidie à sa base par un jet d'eau.

La dureté enregistrée sur l'extrémité refroidie et le long d'une génératrice de l'éprouvette permet de contrôler la trempabilité de l'acier.

Eprouvette :

Un recuit de normalisation est nécessaire avant la trempe (la dureté est influencée par la grosseur du grain).

Température de trempe :

On chauffe l'éprouvette à l'abri de l'air (oxygène), en évitant toute décarburation, pendant trente à quarante minutes pour atteindre la tempèrature de trempe (Ac3+50° C) que l'on maintient pendant vingt minutes.

Refroidissement :

On règle le jet d'eau de manière qu'il monte librement (sans èprouvette) à 65 mm de l'orifice du jet de diamètre 12 mm.

Le jet d'eau est commandé par un robinet à fermeture et ouverture instantanées de façon que ce dernier frappe aussitôt toute la surface de la base de l'éprouvette.

Essais de dureté

L'éprouvette trempée est meulée sur 0,4mm de profondeur, en vue de former deux méplats à 180°, avec une meule abondamment arrosée afin d'éviter tout échauffement.

La dureté est exprimée en unité HRC, mais on peut utiliser HV.

Courbes de trempabilité(FIGURE :5.15).

L'éprouvette est soumise à une série de mesures de dureté tous les 1,5 à 2 mm depuis la surface trempée , sur les premiers 25mm.

Les autres mesures sont faites à des intervalles suffisants pour permettre le tracé de la courbe de dureté sur le diagramme.

Remarques

Les courbes jominy sont utilisées comme essai rapide pour qualifier la trempabilité en comparant la courbe obtenue avec des courbes relatives à des aciers connus.

Elles permettent de déterminer la dureté réalisables à différentes vitesses de refroidissement, allant de la trempe rapide à l'eau jusqu'à la trempe lente à l'air.

Chapitre 6 : Propriétés des aciers et emplois

6.0 Généralités :

Le choix d'un acier aussi judicieux soit –il ne donnera en service pleine satisfaction que si des soins ont été pris, au cours des opérations suivantes :

-Tracé des pièces (bureau de construction)

-Transformation des produits en objets finis (matriçage, filage, etc….)

-application correcte des traitements thermique (trempe, revenu, cémentation, nitruration)

-l'usinage soigné des surface sur lesquelles s'exercent les efforts principaux (tournage, fraisage, moulage)

6.1. Normalisation

La normalisation a pour but de grouper en un certain nombre de types les nombreuses sortes d'aciers existantes pouvant servir à un même usage ,en faisant abstraction de leur origine et de leur marque commerciale.

Cette limitation du nombre de type a pour conséquence de faciliter l'approvisionnement, en imposant des conditions **standards.**

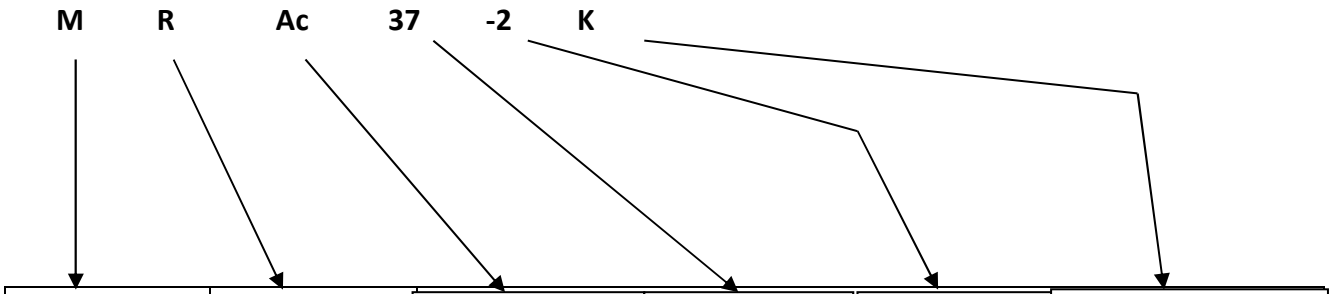
6.1.1. Normes DIN.

Quelques indications pour la lecture des tableaux basès sur les normes DIN.

Aciers fins au carbone **(page 172)**

6.1.2. aciers de construction

Exemple :M R Ac 37-2 K



Prcède de fabrication	Procèdes de coulage	Acier de Construction	1/10 de Rm mini. [N/mm2]	Construction qualités 1.2.3	Etats à livraison
T=acier Thomas **M=**acier siemens-Martin **W=**acier soufflé selon procède spécial **E=**acier électrique **Y=** acier soufflè à l'oxygène	**U=acier non calmé** **R=acier calmé** **RR= acier spécialement calmé**				**K=Etiré à froid** **SH= Ecroûté** **N= recuit de normalisation** **G= recuit doux**

6.1.3. Aciers de cémentation :

Exemple : C K 10

C=Symbole de carbone

K=Teneur minimum de soufre et de phosphore

10=Teneur moyenne de carbone en centième de pour-cent

6.1.4. Aciers d'amélioration

Exemple : C60V

C=Symbole du carbone

60= Teneur moyenne de carbone en centièmes de pour – cent (0.60)

V=Amélioré (traitement thermique obtenu à la livraison)

Aciers fortement alliés (alliages au –dessous de 5%)

Facteurs de multiplication		
4	**10**	**100**
Chrome Cr	**Aluminium Al**	**Carbone C**
Cobalt Co	**Béryllium Be**	**Azote N**
Manganèse Mn	**Bore B**	**Phosphore P**
Nickel Ni	**Cuivre Cu**	**Soufre S**
Silicium Si	**Molybdène Mo**	
Tungstène W	**Plomb pb**	
	Tantale Ta	
	Titane Ti	
	Vanadium V	

Aciers pour travail à froid :

Exemple : 61 Cr Si V 5

61= teneur moyenne de carbone en centimes de pour – cent (0.61)

Cr = teneur moyenne en chrome 5/4=1,25% (facteur 4)

Si et V = teneur moyenne non indiquées de silicium et de vanadium dans la norme.

Aciers pour travail à chaud :

Exemple : 21 Cr Mo V 5 11

21= teneur moyenne de carbone en centièmes de pour – cent (0.21)

Cr 5= teneur moyenne de chrome 5/4 =1,25% (facteur 4)

Mo 11= teneur en molybdène 11/10= 1,10% (facteur 10)

V = teneur non indiquée de vanadium dans la norme.

<u>Aciers fortement alliès</u> (alliages au- dessus de 5%) :

- **Aciers pour soupapes :**
  Exemple : X 45Cr Ni W 18 9
  X= symbole des aciers fortement alliés
  45= teneur moyenne de carbone en centièmes de pour – cent (0,45)
  Cr18= teneur moyenne 18% de chrome
  Ni9= teneur moyenne 9% de nickel
  W= teneur non indiquée de tungstène

<u>Aciers rapides</u> :

<u>Aciers au tungstène :</u>

<u>Exemple :</u> S 10 -4 -3- 10

S= symbole des aciers rapides Ordre des alliages

10= teneur moyenne de tungstène (10%)

4= teneur moyenne de molybdène (4%)

3= teneur moyenne de vanadium (3%)

10= teneur moyenne de cobalt (10%)

7.1-INTRODUCTION

Lorsqu'on ajoute au fer des quantités croissantes de chrome, on constate que la résistance à la corrosion atmosphérique augmente.

En effet, l'addition de chrome au fer, provoque une réaction qui permet la formation en surface d'un film de passivation invisible et protecteur, qui rend le métal passif.

Compte tenu de ces observations, on convient d'appeler acier inoxydable un alliage fer chrome ou la teneur en chrome est supérieure à environ 12%. Les aciers inoxydables sont résistants à de nombreux milieux corrosifs et dans des limites étendues de température.

C'est la qualité du film de passivation qui détermine les qualités d'inoxydabilité de l'acier. Ceci implique que ce film ne soit pas endommagé par des actions extérieures telles que des rayures...

Cependant le terme inoxydable est impropre, on devrait parler d'aciers difficilement oxydables, car comme tous les métaux, ils sont sensibles à la corrosion.

La résistance à la corrosion de l'acier inoxydable provient justement de l'oxydation naturelle de la surface de l'alliage. Bien qu'extrêmement mince, la pellicule protectrice qui se forme à la surface adhère fortement, elle est chimiquement stable, c'est-à-dire passive, dans un environnement qui lui procure suffisamment d'oxygène.

L'acier inoxydable ne peut être considéré comme indestructible, son état de passivité peut être rompu dans certaines conditions, ce qui occasionnera alors de la corrosion.
Les aciers inoxydables sont donc : Actifs lorsqu'ils sont travaillés, décapés ou agressés, ou passifs lorsque l'oxydation a permis de former la peau protectrice.

7.2-Historique

L'histoire des aciers inoxydables est intimement liée à celle du chrome et aux travaux du chimiste français Nicolas-Louis Vauquelin (1763-1889) qui, en 1797, fut le premier à isoler cet élément. Puis, Berthier, un autre français fait en 1821 les premières observations des propriétés «inoxydables» du fer allié au chrome**.**

En 1904, Léon Guillet, puis Albert Portevin publièrent une série d'études relatives à la structure et aux propriétés des alliages fer-chrome couvrant les nuances martensitiques à 13 % de chrome et les nuances ferritiques à 17 % de chrome. En 1909, L. Guillet publia une étude sur les aciers inoxydables au chrome-nickel ou aciers inoxydables austénitiques complétant ainsi ses études précédentes sur les alliages fer-chrome. Le métallurgiste allemand W. Giesen fit, de son côté, et à la même époque, des recherches comparables.

Les études de L. Guillet, A. Portevin et W. Giesen permirent ainsi, dès 1909, de classer les aciers inoxydables en fonction de leur structure et de définir les trois familles
Principales : martensitique, ferritique et austénitique.

Le passage au stade industriel est attribué à Harry Brearley pour les aciers inoxydables

martensitiques. Il serait à l'origine de la première élaboration réalisée à Sheffield en 1913.

Les recherches ultérieures ont notamment porté sur le rôle des éléments d'alliage. Elles ont conduit à la mise au point des nuances à durcissement structural dont les propriétés aux températures élevées ont été mises en évidence par Pierre Chevenard., au début des années 1930 que J. Hochmann a découvert les nuances biphasées austénoferritiques appelées de nos jours duplex.

7.3-Définition d'un acier inoxydable:

L'inox est un alliage résultant de la fusion, à très haute température (plus de1500 °C), de différents constituants, principalement le fer, le carbone et le chrome.

Pour que l'acier soit appelé « inoxydable », ces éléments doivent obéir à la composition suivante :

- Chrome : plus de 10,5 % en poids ;
- Carbone : moins de 1,2 % en poids ;
- Fer : le complément.

D'autres éléments comme le nickel, le molybdène, le titane, le silicium, etc. peuvent être ajoutés ;ils se substituent alors à une partie du fer en vue d'améliorer certaines des propriétés physiques, chimiques ou mécaniques de l'inox. Ainsi, il n'existera pas un inox, mais une multitude d'inox avec des analyses chimiques différentes. Les teneurs en chrome ou en nickel peuvent être très élevées, l'élément restant (balance) sera toujours le fer.

7.4-Diagrammes d'équilibre

Les aciers sont composés de plusieurs éléments dont chacun joue un rôle sur leurs structures et leurs propriétés. Etant donné le nombre important d'éléments qui interviennent dans la composition des aciers, il n'est pas possible d'établir des diagrammes des phases. Toutefois, il est utile de connaitre les diagrammes de phases binaires entre le fer et les autres éléments.

7.5-Fer - Chrome

Le diagramme de phase présenté dans la figure.7.1.constitue un outil essentiel dans l'étude et la description de l'équilibre des phases des aciers inoxydables .La solubilité du chrome dans le fer à haute température est complète et la totalité des alliages Fer Cr se solidifient en mode ferritique .a faibles teneures en chrome on distingue la présence de la phase γ qui est limitée à l'intérieur d'un domaine appelé« boucle γ», cette situation étant dû au chrome qui, compte-tenu de sa structure cristallographique, favorise le développement du domaine α.

La boucle γ (domaine de température 912-1394°C) sépare le diagramme en deux zones principales :

- En dessous de 11% de Cr. Les alliages subissent une transformation α et γ au chauffage et l'inverse au refroidissement.
- Au-dessus de12.7%de Cr, il n'y a plus de transformation de phases et les alliages sont totalement ferritiques.

Entre 11 et 13% de chrome les deux phases α et γ existent en équilibre.

7.6-Diagramme d'équilibre Fe-C-Cr

En présence de chrome, la structure de solidification n'est que très peu modifiée lorsque la teneur en cet élément est inférieure ou égale à 6%, le constituant lédeburitique qui peut se former avec une teneur en carbone élevée (≥2%) est un carbure KC qui n'est autre qu'une cémentite substituée du type (Fe, Cr) 3C. Par contre, lorsque la teneur en chrome est supérieure à 8%, il apparaît dans la lédeburite le carbure K2 qui est du type (Fe, Cr) 7C3.

L'addition de molybdène ou de vanadium à ce type d'acier se traduit par une substitution partielle de ces deux éléments dans le constituant lédeburitique.

Voir figure 7.2 (diagramme d'équilibre Fe-Cr-C à 13% de chrome).

7.7-Classes de structure des aciers inox dans le système Fe- C –Cr

L'idée de partage en éléments alpha gènes et gamma gènes sa conduit Schaeffle à proposer

le diagramme représenté par la figure 7.2 qui montre les quatre familles d'aciers inoxydables classées selon leurs caractéristiques et leurs structures.

Les aciers inoxydables peuvent être classés en quatre grandes familles possédant chacune leurs propres caractéristiques.

- Les Acier inoxydables ferritique ;
- Les Aciers inoxydables martensitiques ;
- les Aciers inoxydables austénitiques ;
- les aciers inoxydables austéno-ferritique également appelés (Duplex) ;

7.8-Aciers inoxydables ferritiques

Ce sont des alliages Fe-Chrome ou Fe-Chrome molybdène dont la teneur en chrome varie de 10,5 à 2,8 % et dont la teneur en carbone n'excède pas 0,08 %.Ces acier ne contiennent en général pas de nickel .Ils sont paramagnétique ne subissant pas de transformation austénitique. Les inox ferritique sont les moins chers, ils sont utilisés pour des pièces de faible épaisseur, par exemple les couverts et les tôles d'appareils ménagers.

- L'équilibre des éléments alpha gènes principalement le Cr, et gamma gènes C, N et Ni doit être tel que l'alliage soit à toutes températures à l'extérieur de la boucle du diagramme fer – chrome.
- Les aciers ferritique à teneur élevée en chrome (>20 %) sont essentiellement utilisés pour leur résistance à la corrosion remarquable (super-ferritique) et à l'oxydation à chaud. Certaines nuances alliées au molybdène (Mo) et/ou au titane (Ti) possèdent une résistance à la corrosion comparable à celle des aciers standards austénitiques.
- Leur fragilité à basse température les indispose à une utilisation cryogénique.

7.9-Aciers inoxydables martensitiques

Ces aciers contiennent en général 12 à 19 % de chrome et leur teneur en carbone variant de 0, 08 à 1,2% ils peuvent contenir du nickel et du molybdène ainsi que certains éléments d'addition tels que le cuivre (Cu), le titane (Ti) ou le vanadium (V).

Ils sont le plus souvent livrés à l'état recuit, il est évidemment recommandé de les utiliser à l'état trempé-revenu représentant le meilleur compromis entre les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion.

Ils présentent un intérêt certain dans les applications à chaud lorsque la température de service n'excède pas 650 °C (turbines de production d'énergie).

Les aciers inox martensitiques sont plus chers, mais ce sont aussi les plus courants .Ils sont utilisés lorsque l'on veut une dureté importante.

Dans la pratique on les utilise :

- Soit après Trempe et revenu de détente vers 200°C, ce qui permet de conserver la résistance mécanique maximale.
- Soit après Trempe et revenu entre 550°C et 700°C, assurant ainsi un meilleur compromis résistance-résilience-tenue à la corrosion.

7.10-Aciers inoxydables austénitiques

Ce sont, de loin, le plus employés parmi les aciers inoxydables : ils contiennent, outre une teneur en chrome minimale de l'ordre de 17% du Nikel (généralement 7% et plus) et des additions éventuelles de molybdène, titane, niobium…

Afin de réduire la susceptibilité à l'écrouissage, du cuivre peut être ajoutée aux aciers de nuances A1à A5

Leur tenue à la corrosion augmente avec les teneurs en chrome et en molybdène Leur résistance à l'oxydation croit avec leur teneur en chrome : les standards à 18% de chrome résistent-en atmosphère oxydante non sulfureuse- jusque vers 800°C au-delà, il faut s'orienter vers des nuances dites "réfractaires" nettement plus alliées.

L'introduction d'éléments stabilisants tels que le titane ou le niobium permet d'éviter la corrosion inter granulaire, en particulier sur les soudures, et accroit la résistance mécanique à haute température.

Lorsque le risque de corrosion est élevé des spécialistes devront être consultés.

7.11-Aciers inoxydables austéno- ferritiques

Les aciers duplex produits à l'heure actuelle ont des proportions approximativement équivalentes d'austénite et de ferrite, ceci étant obtenu par la maîtrise des conditions de transformations à chaud, du traitement d'hyper trempe et bien sûr de la Composition chimique de l'acier.

Ces aciers, se solidifient dans le domaine ferritique est au cours du refroidissement qu'une partie de la ferrite se transforme en austénite.

Les principaux avantages de cette famille d'aciers sont :

- Une limite d'élasticité élevée (460 MPA) de l'ordre de deux fois celle des nuances austénitiques standards.
- Une résistance à la corrosion excellente (corrosion localisée et corrosion sous contrainte).
- Un coût raisonnable dû à leur basse teneur en nickel (~5 %).

7.12-Structure à l'état recuit.

Le but de recuit est de donner à l'acier une structure et un niveau d'adoucissement tel que sa mise en œuvre soit plus aisée, les conséquences attendues de ce traitement sont donc:

- Un usinage plus facile.
- une mise en forme plus aisée par une transformation mécanique.
- Une structure appropriée aux traitements thermiques ultérieurs.
- Microstructure d'usinage : Ferrite – carbures.

7.13-Introduction

Par traitement thermique, on désigne toute opération faite à chaud et destinée à modifier la microstructure d'un métal pour lui donner de nouvelles caractéristiques. Pour les aciers fortement alliés, certains traitements sont quasi obligatoires pour obtenir une performance optimale. ces traitements sont la trempe et le revenu. Ils permettent de modifier et d'ajuster les propriétés mécaniques de l'acier: limite élasticité, résistance à la traction, ténacité, dureté et résilience aux besoins de l'utilisation. d'autres traitements, normalement désignés comme recuits, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. ils ont donc pour but de faire disparaître les états hors équilibre résultant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques.

Tous les types de traitement sur les aciers inoxydables assurant une bonne résistance à la corrosion ont pour but de rendre la répartition en chrome dons le métal la plus homogène possibles en évitant toute diminution de la teneur de chrome dans les zones avoisinantes**.**

7.14-Chauffage des Aciers Inoxydables

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces.

7.15-Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques

L'appareil de chauffage doit permettre :

- D'atteindre et de maintenir toutes les parties de la pièce à une température déterminée et avec une précision de l'ordre de plus ou moins 5°C.
- D'éviter une détérioration du métal et principalement une décarburation dans le cas des aciers.

En général seul le chauffage dans une enceinte fermée possédant une régulation automatique de température est susceptible d'offrir la solution cherchée.

7.16-Refroidissement des Aciers Inoxydables.

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûre, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée, mais on doit prendre en considération les dangers de fissuration des pièces .La vitesse de refroidissement nécessaire à l'obtention d'un état de structure est déterminée selon le diagramme TTT(Température, Transformation, Temps) et TRC (Transformation, refroidissement, continu) Le refroidissement s'effectue dans des bacs utilisant l'eau ou l'huile, dans les deux cas, le bain est maintenu à température constante.

7.17-**Diagramme T.T.T (Température–Transformation-Temps) X20Cr13 :**

Dans le diagramme TTT existe trois domaines de températures ou zones de transformation :

- Domaine perlitique (au-dessus de 550°C).
- Domaine baintique (intermédiaire) entre 550 et 200°C.
- Domaine martenstique au-dessous de 200°C.

7.18-Transformation martensitique

C'est au-dessous d'une température d'environ 180°C que se forme la martensite à partir de l'austénite surfusionnée. Lorsque la température de l'austénite surfusionnée diminue jusqu'à environ 180°C, ou même plus bas, le processus de diffusion est complétement arrêté et une transformation sans diffusion se produit, elle est appelée transformation martensitique.

La martensite est une solution solide de carbone dans le fer α mais très saturée, son réseau cristallin est très distordu (déformé). La transformation martensitique se produit sans déplacement des atomes de carbone, seulement les atomes de fer se déplacent à une distance plus petite que la distance interatomique, cette transformation se produit très vite.

Les points de début et fin de transformation dépendent du pourcentage de carbone, avec l'augmentation du % C, les points M_f et M_s diminuent.

La martensite a une structure très dure, le phénomène de durcissement à un caractère physico-chimique avec le réseau cristallin du fer α très déformé par la présence des atomes de carbone ce qui explique son durcissement.

7.19-trempe des aciers inoxydables

7.19.1-Principe de la trempe

Refroidissement rapide.

Les atomes de c n'ont pas le temps de diffuser → solution de fer saturée en c:martensite (résidu)

Le cycle thermique de la trempe comporte trois phases successives :

- Chauffage à une température T dite température de trempe, correspondant à un état austénitique.
- Maintien à cette température T de façon à réaliser plus ou moins complètement la mise en solution des carbures et l'homogénéisation de l'austénite.
- Refroidissement par immersion dans un milieu (eau, huile, air), suffisamment rapide pour obtenir les constituants de trempe recherchés.

Les effets de la trempe: sont la diminution de la résilience K et la ductilité A%.

7.20-Description de la transformation martensitique

7.20.1-Caractéristiques générales

La transformation s'amorce dès la température Ms et se déroule non pas dans des conditions isothermes, mais dans un intervalle de température, et ne s'arrête qu'a des valeurs M_f inférieurs à 20°C.

En pratique et à la fin de la réaction, il subsiste toujours une faible proportion d'austénite non transformée, c'est à dire de l'austénite résiduelle.

La position des points M_s et M_f ne dépend pas de la vitesse du refroidissement, elle est conditionnée par la composition chimique de l'austénite. La température des points M_s et M_f est d'autant plus basse que la teneur de l'austénite en carbone est plus élevée.

7.20.2-Austénite résiduelle après trempe

Dans le cas des aciers à outils, la transformation martensitique ne se produit pas jusqu'à la fin, il subsiste après trempe une quantité non négligeable d'austénite résiduelle, qui joue un rôle important au niveau des propriétés d'emploi :

- Difficulté d'obtention de la dureté.
- Transformation en martensite secondaire par écrouissage.
- Déformation au traitement, etc…

7.20.3-La composition chimique

La quantité d'austénite est d'autant plus grande que les points M_s et M_f se trouvent plus bas, c'est à dire que la teneur de l'austénite en carbone et en éléments d'alliage est plus grande.

7.21-Structure du revenu

7.21.1-Introduction

La structure à l'état brute de trempe d'un acier se compose de martensite et d'austénite résiduelle qui sont des phases hors d'équilibre, avec en plus; dans les aciers les plus alliés des carbures non dissous. La martensite est une phase très dure, mais très fragile aussi. pour ces raisons, le traitement d'austénitisation suivi d'une trempe est généralement prolongé par un revenu. Cela consiste à chauffer l'acier à une température variable, mais inférieure à la température Ac_1, pendant un temps plus au moins important. Par ce traitement, la matrice martensitique, qui présente une structure de solution solide sursaturée, rejette le carbone sous forme de très fins carbures. La structure finale sera donc une phase carbure finement dispersée dans une matrice ferritique qui garde certains traits structuraux similaires à la matrice originale (martensite). A cela s'ajoute la décomposition de l'austénite résiduelle en phases plus proches d'équilibre à savoir = la bainite ou sa transformation en martensite.

7.21.2-Traitements de revenu :

La martensite obtenue après trempe doit subir un traitement de revenu destiné à améliorer la ductilité et la résistance aux chocs (appréciée par l'essai de résilience, par exemple). nous excluons de ce paragraphe les traitements de durcissement structural pouvant avoir lieu à des températures identiques. nous présentons par plage de température les effets de ce traitement.

8.1-Introduction

Dans cette partie, nous faisons le point sur les différentes techniques expérimentales utilisées lors de la réalisation de ce travail. L'interprétation exacte des différents résultats obtenus lors de cette étude repose sur les mesures correctes et justes provenant des instruments techniques utilisés et des limites technologiques de chaque équipement.

8.2-Dureté

L'essai Rockwell, très rapide (quelques secondes), est le plus employé : il permet la mesure de la dureté en série.

Le test Rockwell peut déterminer la dureté d'une structure, allant des métaux les plus doux aux aciers les plus durs (aciers rapides,….). La valeur de dureté Rockwell obtenue est un nombre inversement proportionnel avec la profondeur secondaire du pénétrateur soumis à la deuxième charge (majeure).

Les pénétrateurs Rockwell sont de deux sortes : coniques diamantés (échelle HRC) pour les essais sur structures durs, et à bille en acier (échelle HRB) pour les matériaux relativement moins durs. L'ensemble des mesures de la dureté sur l'acier a été réalisé à l'aide d'un duromètre universel de type HP250.

Les mesures sont faites sur une surface polie de l'échantillon carré.

8.3-Essai de traction

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester X20Cr13), cylindrique, deux forces égales et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

Principe: L'essai est réalisé sur une machine de traction. On applique progressivement et lentement (sans choc) à une éprouvette cylindrique de formes et de dimensions normalisées,
un effort de traction croissant.

8.4-.Microstructure

La métallographie par microscope optique de nos échantillons donne des informations sur la morphologie et le nombre de phase en présence.

8.5-Polissage

Pour un polissage mécanique réussi, il est recommandé

- D'éviter les abrasifs grossiers pour le prépolissage
- Les abrasifs diamantés pour le prépolissage fin et le polissage doivent être efficaces et garantir, l'enlèvement de toute la déformation provenant du prépolissage
- Un polissage final aux oxydes avec de la silice colloïdale ou de l'alumine devra donner une surface exempte de déformation.

Une procédure en quatre étapes, accomplies sur un équipement de préparation automatique, donne de bons résultats reproductibles. Les aciers inoxydables sont difficiles à attaquer chimiquement et les réactifs d'attaque recommandés sont très corrosifs et nécessitent une manipulation très précautionneuse.

Alternativement, le polissage et l'attaque électrolytiques sont recommandés, donnant une surface sans déformation, mais ne préservant pas les carbures.

Les échantillons destinés à l'observation sont polis successivement sous eau par meulage mécanique sur papiers abrasifs de granulométrie décroissante, puis suivis d'un polissage de finition par une suspension d'alumine sur un drap fin.

8.6-Attaque chimique

Pour les aciers martensitiques 925ml d'éthanol; 25 g d'acide picrique

Les observations effectuées sur un microscope optique de type ZEISS AXIOVER T40 MAT équipé d'une caméra photo numérique.

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions et de séparer les détails de cette image afin qu'il soit observable par l'œil humain.

Il est utilisé en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage

8.7-Analyse de l'acier X20Cr13

8.7.1-Introduction

Apparu dès la première guerre mondiale, l'acier X20Cr13 constitue de nos jours, avec ses dérivés, l'une des premières familles d'aciers inoxydables, à la fois par l'importance des tonnages mis en œuvre chaque année et par l'extraordinaire diversification de ses emplois.

Pourtant, malgré l'ancienneté et la grande diffusion de ces aciers, les utilisateurs rencontrent encore parfois de sérieuses difficultés dans leur mise en œuvre (notamment dans la conduite de leur traitement thermique).

C'est cette lacune que nous voudrions essayer de combler en partie, en donnant sur ce sujet les informations nécessaires aux utilisateurs.

8.8Caractéristiques de l'acier X20C13

Ces aciers sont très couramment désignés comme aciers inoxydables.

L'acier X20Cr13est utilisé à l'état trempé et revenu, caractérisé par des niveaux de dureté élevée à température ambiante (44 à 53 HRC).

Ils possèdent une très bonne trempabilité, leur courbe de trempabilité est pratiquement horizontale ; ils sont dits autotrempants.

Les fortes teneurs en carbone et en chrome ont permis une grande résistance à la corrosion par la présence des carbures plus durs et plus stables.

8.9-Compositions et structure des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables ont été mis au point pour résoudre les problèmes de corrosion humide posés par les alliages ferreux. Comme les autres aciers .ce sont des alliages métallique à base de fer (alliage fer-carbone) à teneur en carbone variant de 0.02 à 1% (pour éviter la précipitation de carbures aux joints de grains) et qui doivent contenir au moins 10.5% de chrome et contenant éventuellement d'autre éléments d'alliage soit de type interstitiel comme le carbone ou l'azote, soit de type métallique tels que le nickel, le molybdène, le titane…etc.

8.10-Domaines d'utilisation :

Cet acier satisfait correctement les besoins et exigences des instruments médicaux, chirurgicaux et dentaires.

8.11-Particularités :

La teneur relativement basse en carbone confère à cet acier à l'état trempé-revenu, poli et passivé, une meilleure résistance à la corrosion. Elle est supérieure à celle de l'acier CHRONIFER® M-13 (1.4034) et surtout à celle de la nuance CHRONIFER® Labor M-13 (1.4035).

8.12-Désignations :

No de Matière	1.4021
DIN EN	X20Cr13, EN 10088-3
AISI/SAE/ASTM	AISI 420, AISI 420A, ASTM F899, A276, A959
AFNOR	X20Cr13 (ancien Z 20 C 13)
ISO	7153-1 (B)
UNS	S 42000
NF	S 94-090
JIS SUS 420 J1	SUS 420 J1

8.13-Composition chimique

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0.16-0.25	**Max 1.00**	**Max 1.00**	**Max 0.04**	**Max 0.03**	**12-14**	**Max 1**	**solde**

8.14-Caractéristiques mécaniques (X20Cr13)

8.14.1-Dureté

Les mesures sont faites sur une surface polie de l'échantillon cylindrique de dimension (20mm de diamètre et de 30mm de longueur).

8.14.1.1Tableau des duretés avant trempe (à l'état recuit).

échantillons a l'état recuit	1	2	3	4
Dureté HRC	21	22	21	21

8.14.1.2-Tableau des duretés après trempe (T=1000°C avec temps de maintien 17 min)

échantillons et leur T (°C)	1	2	3	4
Dureté HRC	54	54	55	53

8.14.1.3-Tableau des duretés après revenu.

éprouvettes et leur température (°C)	éprouvettes 1 à (T=200°C)	éprouvettes 2 à (T=400°C)	éprouvettes 3 à (T=600°C)	éprouvettes 4 à (T=700°C)
Dureté HRC	54	51	37	29

8.14.2-Tractions et résiliences (à l'état recuit).

Propriété mécanique	Rm (Mpa)	Re (Mpa)	A %	Kcu J/cm2
Etat recuit	**519**	**412**	**13**	**92**

8.14.2.2-Tractions et résiliences (à l'état revenu).

propriété mécanique / T de revenu	Rm (Mpa)	Re (Mpa)	A(%)	Kcu (J/cm2)
200	1544	1332	7	50
400	1382	1276	12	51
600	1120	900	14	84
700	756	667	22	120

Conclusion partielle

Dans notre étude nous avons mis en évidence l'influence des paramètres des cycles thermiques, tout particulièrement celles de la température d'austénitisation, et la température de revenu sur les propriétés structurales et mécaniques de l'acier X20Cr13. L'austénitisation de ce type d'acier est très délicate, elle doit être optimale pour assurer la dissolution des carbures et homogénéiser l'austénite. S'il y a trop peu de carbures dissous, on risque, lors de la trempe, de ne pas atteindre la dureté désirée. S'il y on a trop, par élévation de température, on peut avoir trop d'austénite résiduelle (faible dureté), à la suite d'un fort abaissement du début de la transformation martensitique Ms.

Considérant que l'acier X20Cr13 est un acier autotrempant, l'austénite résiduelle de trempe se déstabilise pendant le revenu et se transforme en martensite au refroidissement qui le suit. Cette dernière diminue la résilience et augmente la fragilité. C'est pourquoi un second revenu est nécessaire pour détendre cette nouvelle martensite fragile.

La température de revenu correspondant aux transformations et aux précipitations attendues influe fortement sur la résilience de l'acier, un choix judicieux s'impose pour augmenter les propriétés de l'acier.

Conclusion générale

L’objectif de notre travail est d’avoir une maitrise de l’acier depuis le minorai jusqu’ au matériau.

On s’est intéressé aux différents minerais de fer, à la sidérurgie et ses différents procédés, aux différents essais que peut subir un acier, aux traitements thermiques et différents modes d’emploi des aciers.

On a étudié comme cas pratique l’acier inoxydable X20Cr13 on a réalisé les traitements thermiques trempe + revenu à déférentes températures.

On a effectué les essais de dureté, de traction et de résilience.

Finalement, on a tracé les courbes utiles à l’utilisateur