

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme
De master en Génie Mécanique

Option : Ingénierie des Matériaux et des Surfaces(IMS)

Thème

Traitement de surface des fontes grises Ft25

Proposé et dirigé par :

Le Professeur Pr Nacer E Bacha

Réalisé par :

El Mechri Ibrahim

Zahaf Aness

ANNEE UNIVERSITAIRE 2020/2021

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à nos aimables parents,

aux êtres les plus chers à nous sœurs et frères, famille et amis, toute la

promotion IMS 2021

Toujours les meilleurs

Toujours dans le cœur

REMERCIEMENT

Tout d'abord je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience de mener à bien mon travail de PFE.

Je remercie ma famille, à qui revient le mérite de m'avoir éduqué, encouragé et soutenu.

Je tiens à remercier mon promoteur Mr le professeur BACHA Nacer-Eddine d'avoir bien voulu me proposer le sujet et ensuite encadré mon travail en m'apportant l'orientation et l'aide nécessaire.

Je n'oublie pas de remercier les enseignants de Département Génie mécanique, en particulier ceux de la spécialité science des matériaux, pour m'avoir offert un agréable cadre de formation, Grand merci.

Je tiens également à remercier tous mes collègues en général et en particulier Hanane El Bahi et Houssam pour les avoir accompagnés pendant ces cinq années et pour les avoir encouragés à mener à bien ce travail.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'élaboration de ce travail.

EL Mechri Ibrahim

REMERCIEMENT

Louange à ALLAH par la grâce duquel les bonnes choses se réalisent

Je remercie Dieu de m'avoir offert l'opportunité de faire des études supérieures, de m'avoir guidé à cette spécialité et de m'avoir donné tout ce dont j'ai besoin pour mener ce travail à bon escient.

Quoi que je dise je ne serai pas capable de dénombrer les bienfaits d'Allah dont je jouisse et les faveurs dont il m'a comblé

Avec un cœur rempli de gratitude et de joie, j'écris ces mots afin de montrer du plus que je peux ma reconnaissance envers les personnes qui ont participé de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail en particulier, et en général à tous ceux qui ont fait partie de mon parcours éducatif.

Je tiens à remercier en premier lieu notre promoteur Mr le professeur BACHA Nacer-Eddine qui a bien voulu nous superviser, son grand appui au long de ce travail, autant technique que moral, nous a permis de concrétiser ce mémoire et surtout d'évoluer dans le domaine de la métallurgie

Merci pour son engagement, son aide et ses précieux conseils

Mes remerciements les plus distingués vont également à l'ensemble de nos professeurs qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de nos études universitaires. Merci pour la qualité des connaissances transmises, merci pour leurs patiences.

Ensuite je remercie chaleureusement mes collègues d'études, mon binôme et tous les gens que j'ai côtoyés à l'université de Saad Dahlab. Merci pour cette belle aventure.

Dernier remerciement, mais non des moindres vient du fond du cœur, en premier, à mes chers parents, merci de m'avoir éduqué et d'avoir fait de moi l'homme que je suis. Quoi que je fasse je ne saurais vous rendre vos sacrifices pour moi.

Et en second lieu, merci à toute ma famille, mes amis et tous les gens que j'aime pour leurs encouragements, leur amour, leur confiance, leur soutien inconditionnel et surtout pour leur présence dans ma vie.

Zahaf Aness

Résumé

Les fontes grises lamellaires caractérisées par une très bonne résistance à l'usure et un bas coefficient de gravure utilisé dans la majorité des cas en construction mécanique sont exposées à quelques conditions de service très importantes, exigeant des propriétés mécaniques qui peuvent répondre à ce type de sollicitations.

Ce présent travail a été mené dans l'objectif principal d'étudier les effets d'un traitement de surface par projection thermique sur les propriétés structurales et mécaniques d'une fonte grise. De plus, des traitements thermiques classiques seront effectuées sur la fonte grise afin de connaître sa réponse et prospector les meilleurs choix à sélectionner. La dureté, la microdureté et l'observation métallographique ont été les principales utilisées pour caractériser la fonte grise après le traitement reçu.

Les résultats ont montré qu'un traitement thermique de normalisation et un traitement thermique de trempe à l'huile donnaient les meilleurs résultats en termes de microstructure et de dureté.

La trempe superficielle peut être utilisée efficacement si les pièces en fonte grise ne sont pas massives. La trempe à l'huile immédiatement après le traitement superficiel favorisait la formation d'une structure perlitique fine.

La projection thermique avec refusion dépend du type de poudre utilisée. La Chromotec ne perturbe pas la microstructure de la fonte grise. Elle améliore de manière substantielle la tenue à la corrosion et à la chaleur. La poudre Tungtec provoque l'apparition d'une fonte blanche hypereutectique. Elle peut convenir à la résistance à l'abrasion s'il n'y a pas de risques d'apparition de fissures. Pour la poudre RW12496 + 51000, le revêtement déposé a un aspect plus lisse et homogène. La microdureté du revêtement est élevée. Elle est équivalente à celle du revêtement de Tungtec avec cependant un effet thermique moins important. Son utilisation est très utile pour les épaisseurs de revêtements importantes.

Introduction générale

Les impératifs techniques et économiques des industriels de tous les secteurs imposent la réduction des coûts et l'amélioration des performances pour faire face à ces exigences, de nombreux différents traitements de surface ont été mis au point et sont aujourd'hui utilisés industriellement. Parmi ceux-ci figurent le rechargement par projection thermique dont l'influence de la déposition des rechargements durs par torche à flamme sur la microstructure des substrats fait l'objet de ce travail.

Généralement économique et de mise en œuvre simple, le rechargement permet d'adapter les surfaces de pièces aux diverses sollicitations auxquelles elles sont exposées en cours d'exploitation.

Sur pièce usagée, le rechargement est utilisé pour reconstituer la forme initiale de cette pièce. L'utilisateur peut, à cette occasion, en profiter pour réaliser un dépôt avec des matériaux qui vont augmenter les caractéristiques de résistance en service des surfaces considérées (matériau plus dur pour surfaces frottantes, matériau plus noble pour surfaces corrodées), donc le rechargement redonne une nouvelle vie technique à la pièce. Sur pièce neuve, le rechargement peut être source d'économie, en ne mettant qu'aux seuls endroits nécessaires, le matériau adapté.

Après avoir rechargé les différents échantillons, des observations microstructurales (Optiques) ont été appliquées des tests mécaniques (avant et après la projection) à savoir (dureté HV), afin d'indiquer et de choisir un meilleur résultat de rechargements utilisés et voir l'influence de la procédé utilisé sur le comportement mécanique des échantillons en acier dans notre cas.

Dans notre mémoire, les études de rechargement des poudres (chrome tec 10680 ; tang tec 10112 ; roto tec 51000 - 19985 ; et 12496) est déposé sur des substrats (fonte ft 25), par projection thermique est présenté en deux parties.

La première partie met à la disposition du lecteur les éléments bibliographiques qui comprend deux chapitres.

Un premier chapitre on a décrit le principe de traitement de surface (projection thermique - traitement thermique et montre ses différents procédés.

Le deuxième chapitre est une synthèse des données existantes sur les caractéristiques et les propriétés des fontes en générale.

La deuxième partie concerne l'approche expérimentale de notre étude, comprend deux chapitres.

Le troisième chapitre traite la description des méthodes expérimentales ainsi que les moyens d'analyses utilisés dans notre travail. Ainsi que les deux techniques expérimentales ayant servies au rechargement de nos échantillons, (projection thermique, traitement thermique) Nous présenterons aussi toutes les techniques d'observations métallographiques, et d'essais mécaniques (dureté).

Le quatrième chapitre englobe les résultats obtenus avec les interprétations correspondants.

Sommaire

Résumé.....	
Introduction générale.....	
Chapitre 1 Traitement de surface	1
1. Introduction	2
2. Mécanismes de traitement de surface et Les différentes technologies	3
2.1. Procédés industriels :.....	4
2.1.1. Recuit :	4
3. Revêtements métalliques	7
3.1. Projection thermique :	8
3.1.1. Projection thermique flamme :	8
3.1.2. Projection à flamme-fil.....	9
Chapitre 2 Les fontes.....	11
1. Historique	12
2. Définition.....	12
3. Propriétés mécaniques de la fonte	13
4. Type des fontes.....	13
4.1. Fontes blanches	13
1.3.1. Fonte à graphite lamellaire	16
2. Influence des éléments d'alliage sur les fontes	16
Chapitre 3 Techniques expérimentales.....	24
1. Introduction	25
2. Les substrats	25
3. La poudre.....	25
4. Préparations des pièces à projetées.....	27
5. Traitements thermiques	28
6. Le polissage.....	29
7. Attaque chimique.....	30
8. L'essai de dureté.....	31
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	32
4.1 Introduction	33
4.2 Fonte grise FT25 à la réception.....	33
4.3 Les traitements thermiques.....	35

Sommaire

4.3.1 Trempe à l'eau	35
4.3.2 Trempe à l'huile	36
4.3.3. Refroidissement à l'air libre.....	36
4.3.5. Traitement thermique refroidissement au four	37
4.4. Les traitements superficiels	38
4.5 Les revêtements par projection thermique	40
4.5.1 Revêtement Chrometec	40
4.5.2 Revêtement Tungtec.....	42
4.5.2 Revêtement Rototec 12496 avec ou sans la 51000.....	42
CONCLUSION	45
References	46
La Liste des Figures	49

*Chapitre 1 Traitement de
surface*

1. Introduction

Un traitement de surface est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données.

Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie

Les traitements de surface ont pour objet de modifier la surface d'une pièce afin de lui conférer des propriétés particulières :

- sur le plan esthétique par exemple, un aspect brillant, mat, satiné, velours ou coloré est réalisé ;
- sur le plan technique, amélioration des capacités anticorrosion, anti-usure, de dureté, de résistance aux frottements, de conductibilité, de soudabilité de la pièce ;
- le traitement peut aussi lui conférer des propriétés optiques, magnétiques ou thermiques particulières.

Les traitements de surface ont des applications dans de très nombreux domaines, tels que l'automobile, l'aéronautique, l'ingénierie industrielle ou électrique, le sport, l'électronique, l'armement, etc., permettant l'amélioration de la qualité et des performances des pièces.

Objectifs des traitements de surfaces

- Augmenter la durée de vie et la fiabilité d'un produit :
- lutte contre la corrosion et l'usure,
- amélioration de la tenue en fatigue

Maîtriser les performances d'une pièce :

- résistance à la corrosion,
- conductibilité (ou isolation) électrique ou thermique, soudabilité,
- isolation aux rayonnements,
- caractéristiques optiques de la pièce.

Améliorer l'aspect externe d'un objet :

- rugosité,
- couleur, brillance,

- réflectivité, antireflets

Domaines d'applications

- L'aspect de surface/décoration
- La résistance à la corrosion
- La résistance au frottement
- La résistance à l'abrasion/érosion
- La résistance à la fatigue
- L'aptitude au collage

2. Mécanismes de traitement de surface et Les différentes technologies

Un traitement de surface est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisations données.

De ce fait, le but des traitements de surface est d'améliorer ou modifier les propriétés mécaniques et physiques d'une pièce (conductibilité électrique, résistance à la usure ou au frottement...), de maîtriser sa performance (résistance à la corrosion, solidité), et d'améliorer son aspect externe. Ils permettent d'augmenter la durée de vie d'un produit. Il existe différentes familles de technologies de surface. Ces dernières vous sont expliquées ci-dessous.

- Les revêtements : le matériau d'apport ne réagit pas ou peu avec le substrat.
- Les traitements par conversion chimique : le matériau d'apport réagit superficiellement avec le substrat.
- Les traitements thermo-chimiques avec diffusion : le matériau d'apport diffuse dans le substrat.
- Les traitements superficiels avec transformation structurale : la structure métallurgique du substrat est modifiée.

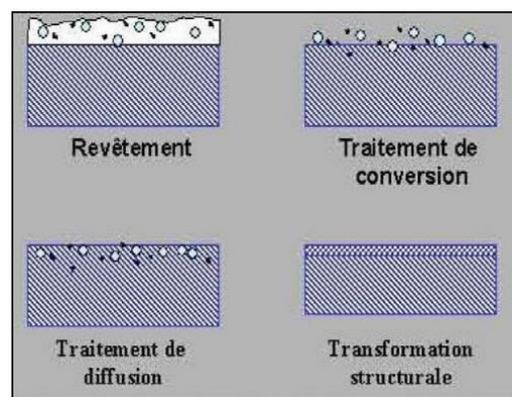


Figure 1-1 : différentes familles de technologies traitement de surface.

2.1. Procédés industriels :

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de:

- Un échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation.
- Maintien à une température définie.
- Refroidissement.
-

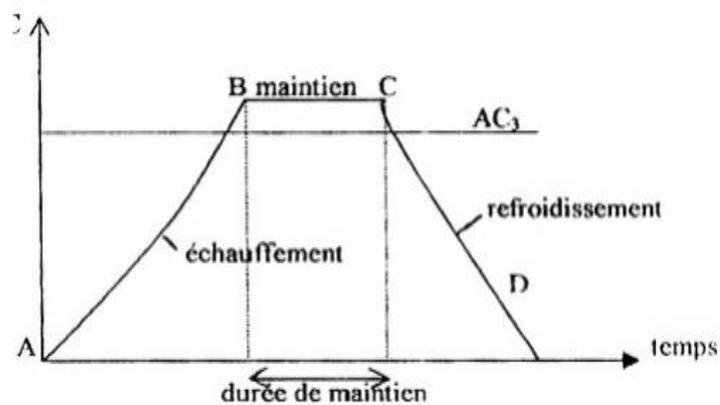


Figure 1-2 : Procédé de traitement thermique

2.1.1. Recuit :

Le recuit est un traitement thermique appliqué pour obtenir un état d'équilibre thermodynamique. Son cycle est défini par les opérations suivantes :

- Chauffage à une vitesse contrôlée jusqu'à une température dite de recuit déterminée en fonction du but recherché.
- Une fois la température du recuit est atteinte, on effectue un maintien isotherme contrôlée ou des oscillations autour de cette température, pendant un temps déterminé qui varie selon le traitement antérieur, le volume de la pièce et en fonction du but à réaliser.
- Un refroidissement obligatoirement lent et qui dépend de la nature de l'alliage. Cette vitesse doit être proche de la vitesse critique de recuit afin de rester le plus proche possible des états d'équilibre. Elle varie en général pour les aciers au carbone entre 150 et 200 °/heure alors qu'elle est plus lente pour les aciers alliés à austénite de l'ordre de 30 à 100 °/heure.

Suivant l'état initial de l'acier et la température de recuit. On constate trois types de recuit :

- Recuit d'homogénéisation : Ce type de recuit s'applique aux aciers bruts de coulée et aux aciers moulés.
- Recuit de recristallisation : après le traitement thermique, la dureté et la résistance du métal augmentent et sa plasticité diminue et donc ce type de recuit est capable d'éliminer ces contraintes.
- Recuit de détente : nommer aussi recuit de relaxation ou recuit de stabilisation. Cette forme de recuit est appliquée aux pièces moulées, usinées et soudées

2.1.2. Trempe

La trempe est un traitement thermique qui a pour but de conférer les meilleures propriétés de résistance en vue de résister aux sollicitations mécaniques les plus durs.

Le traitement de trempe comporte d'abord un chauffage, dans des conditions semblables à celles des recuits, jusqu'à atteindre une température, généralement déterminée grâce aux diagrammes d'équilibre.

Un maintien suffisant à cette température de trempe afin d'obtenir une structure homogène, on constate que cette durée est évidemment d'autant plus grande que la taille de la pièce à tremper est plus importante.

Le refroidissement depuis la température de trempe s'effectue avec une vitesse supérieure à une vitesse critique caractéristique de l'alliage trempé.

La trempe superficielle permet de modifier les caractéristiques mécaniques de la couche superficielle d'une pièce en fonte grise, en fonte spéciale, en fonte malléable perlitique ou en fonte G.S. Ce traitement permet d'obtenir simultanément deux caractéristiques opposées :

- une grande dureté en surface ;
- une grande résilience de la pièce.

Comme pour les aciers, il existe trois types de trempe superficielle :

- au chalumeau oxyacéthylique ;
- par induction ;
- par immersion.

2.1.3. Trempe après chauffage à la flamme :

La trempe à la flamme de pièces en matériaux ferreux sert à prévenir l'usure. Elle prolonge considérablement la durée d'utilisation de ces pièces, en particulier celle des organes d'entraînement comme les roues d'engrenage ou les bagues de roulement. À l'aide d'un

chalumeau la température de la surface de la pièce se transforme médiatement jusqu'à la température désirée qui dépasse généralement 900°C

Ce procédé consiste à chauffer localement la surface des pièces et à la refroidir brusquement de manière à obtenir une couche durcie sans affecter l'intérieur de la pièce.

La trempe à la flamme convient particulièrement à la fabrication mécanique à l'unité et en série. La grande puissance de la flamme oxyacétylénique permet de chauffer les couches superficielles si rapidement que l'accumulation de chaleur n'agit que sur une épaisseur limitée sans pénétrer dans les couches plus profondes. Le refroidissement immédiat à l'eau permet de dissiper ensuite la chaleur introduite

La forme et les propriétés mécaniques de la pièce restent inchangées, étant donné que le matériau situé en dessous de la couche durcie ne participe pas aux processus de transformation de structure.

Les différents procédés de trempe à la flamme sont soit :

- de type stationnaire
- soit de type au défilé (« de proche en proche »)

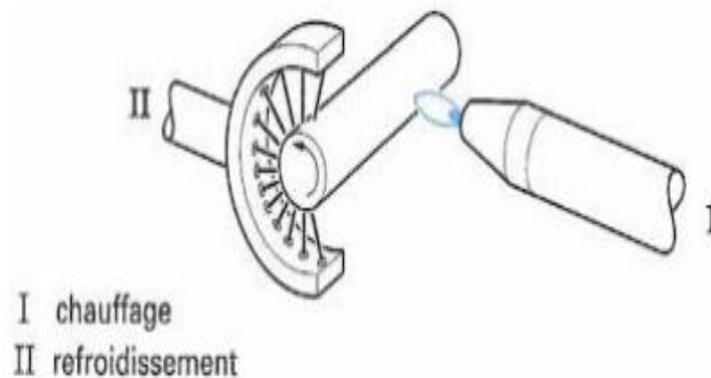


Figure 1-3 : Trempe générale instantanée d'une surface de révolution

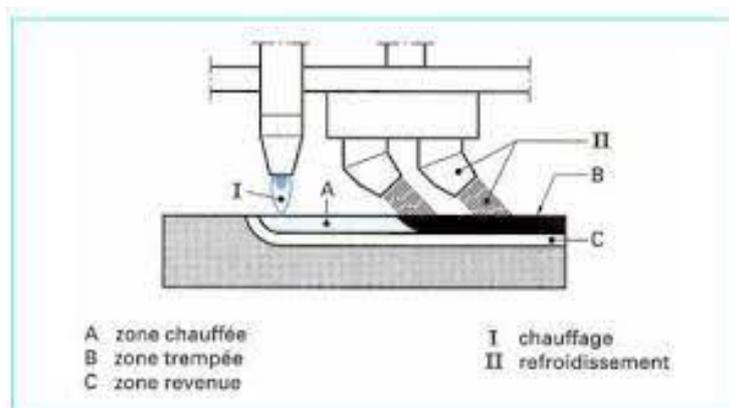


Figure 1-4 Trempe au défilé (« de proche en proche »)

Avantages par rapport à l'induction :

- zones affectées thermiquement réduites
- d'autoriser une dureté plus forte liée à une structure plus fine

En revanche, les surfaces relativement étendues ne peuvent être traitées que par recouvrement

2.1.4. Revenu

Le revenu est un traitement thermique appliqué à un matériau trempé en vue de lui conférer un compromis entre ses caractéristiques de résistance et de ductilité.

Son cycle thermique consiste aux opérations suivantes :

- Chauffage jusqu'à une température dite de revenu inférieure à la température de trempe et à celle du recuit. La nature des phases obtenues et leur composition sont en général voisines de celles obtenues par recuit, mais la structure micrographique est considérablement plus fine.
- Maintien contrôlé à cette température.
- Refroidissement jusqu'à la température ambiante.

3. Revêtements métalliques

Le revêtement est un terme qui désigne toute couche de métal obtenue sur une surface par un procédé de recouvrement, tel que la surface du métal les modifications du matériau de base à l'interface négligeable et la couche superficielle du métal résultat de ce traitement est presque homogène pour que la qualité de la couche soit définie par son épaisseur

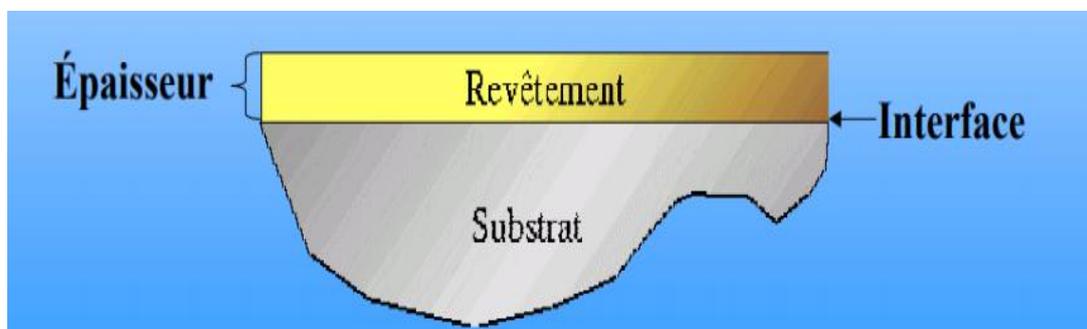


Figure 1-5 : revêtement sur un substrat

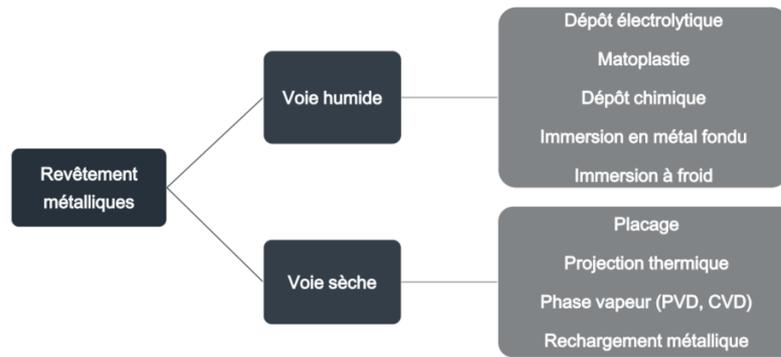


Figure 1-6 : schéma du revêtement métallique

3.1. Projection thermique :

Le principe consiste essentiellement à fondre le matériau d'apport sur la surface du substrat par projection grâce à un gaz vecteur. Le mode opératoire se résume par: on fonde la matière à déposer totalement ou partiellement dans une source de chaleur, la pulvérisation de la matière se fait par un gaz vecteur enfin les gouttelettes formées seront transportées jusqu'à la surface à revêtir

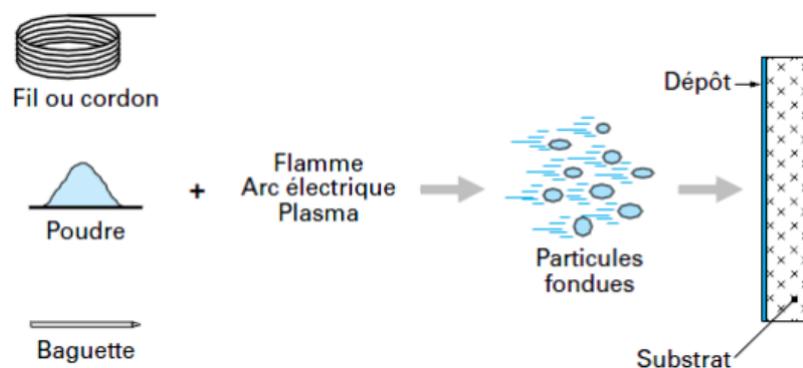


Figure 1-7 : Principe fondamental de la projection thermique

3.1.1. Projection thermique flamme :

C'est la projection qui utilise l'énergie calorifique de la combustion de gaz

❖ Projection à flamme-poudre

La projection flamme poudre est certainement le procédé le plus simple de tous les procédés de projection thermique. Il consiste à introduire une poudre à travers l'orifice central d'une buse-

brûleur, la poudre fond et est entraînée par les gaz oxygène-carburant (généralement oxygène-acétylène ou oxygène-hydrogène) sur la pièce à revêtir. Ce système de projection est peu énergétique. Les revêtements réalisés par ce procédé contiennent un taux d'oxydes élevé ainsi qu'une forte porosité pouvant approcher 20%. La qualité des revêtements dépend aussi de la qualité des poudres. Le principe de fonctionnement d'un tel pistolet est illustré sur la figure suivante 1-8. L'utilisation de débit-litres pour contrôler les débits de gaz est un facteur important.

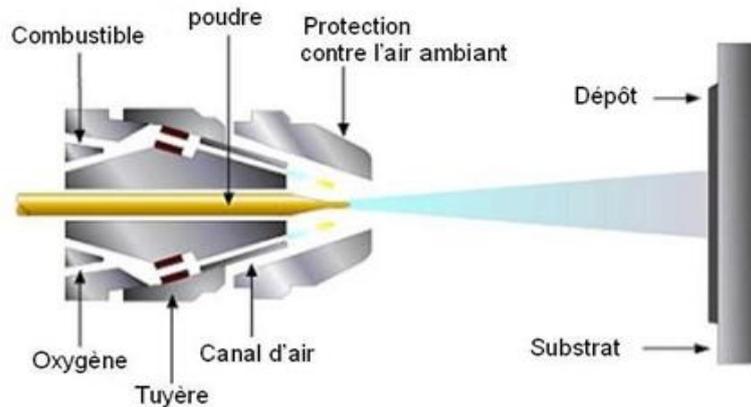


Figure 1-8 : Schéma du procédé de projection par flamme

3.1.2. Projection à flamme-fil

Dans ce procédé, le matériau d'apport est sous forme de fil, de baguette ou de cordon. Il utilise les mêmes gaz que ceux utilisés en projection flamme-poudre (oxygène+gaz combustible) auxquels s'ajoute de l'air comprimé servant à l'atomisation de l'extrémité fondue des fils [1, 2]. Les épaisseurs déposées peuvent aller de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres (figure 1.9).

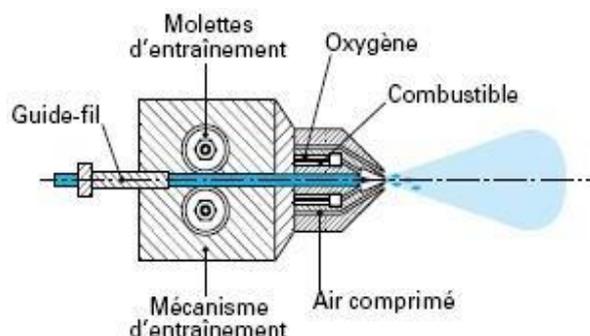


Figure 1-9 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil

L'application de la projection flamme-fil : Cette technique permet de projeter des métaux (Zn, Al, Cu, Sn, Ni, Mo), des aciers et des alliages à base de Zn, Cu et de Ni sous forme de fils et quelques céramiques (Al_2O_3 / $Al_2O_3 - TiO_2$ / ZrO_2 avec stabilisants) sous forme de cordons ou de baguettes.

3.1.3. La projection à flamme fusion-refusion (Torche Super-Jet)

La torche à flamme Eutalloy est un chalumeau oxy-acétylène destiné pour la projection thermique qui dépose des revêtements sous forme de poudre anti-usure ou un rechargement dur (figure 1-10). Les poudres alliées sont projetées sur la pièce à revêtir et suivies d'un chauffage pour les fusionner. Dans ce type de déposition, l'adhérence des revêtements est de type métallurgique. Le revêtement dense n'est pas affecté par la dilution et conserve toutes ses propriétés intrinsèques [8].

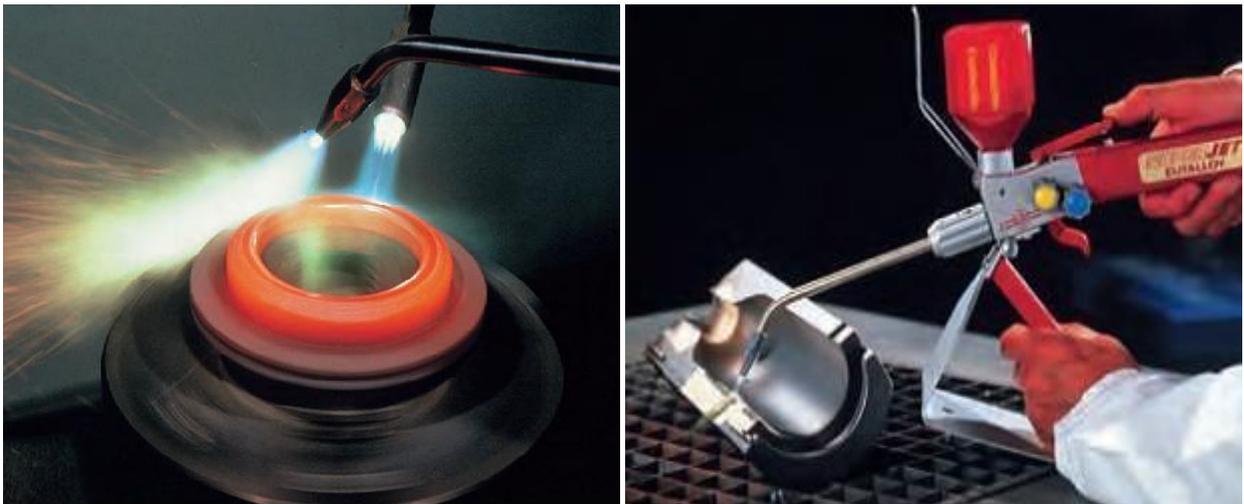


Figure 1-10. La projection par le Pistolet Eutalloy (super Jet-S).

Les applications de la projection à flamme Eutalloy :

Cette technique de projection est polyvalente et rapide, elle est très utilisable dans toutes les positions sur un large éventail de métaux de base y compris les aciers, aciers alliés, aciers inoxydables et la fonte. Elle permet aussi de projeter plusieurs poudres tel que les alliages de nickel-chrome, les carbures « carbure de tungstène ».

Chapitre 2 Les fontes

1. Historique

La présence de fer dans la vie quotidienne a commencé vers 1200 avant notre ère, englobant un large éventail d'utilisations allant des outils agricoles aux armes de guerre. Les forgerons sont devenus une profession critique, travaillant avec le fer pour changer ses propriétés et façonner le matériau en outils. Chaque village et ville aurait un atelier de forgeron, où étaient fabriqués des faucilles, des socs de charrue, des clous, des épées, des chandeliers, etc.

La découverte de la valeur du fer a conduit à ce qui est devenu l'âge du fer, en raison de la prédominance de ce matériau dans les applications sociales et militaires. Un autre jalon pour les métaux suivrait : la révolution industrielle a changé la façon dont les métaux étaient produits et transformés en produits, y compris le fer.

La fonte a été découverte en Chine durant la période des Royaumes combattants (IV^e siècle av. J.-C.).[45]

2. Définition

La fonte est un alliage de fer et de carbone, contenant en outre, un certain nombre d'éléments secondaires

La fonte contient 2 à 4% de carbone et d'autres alliages et 1 à 3% de silicium, ce qui améliore les performances de coulée du métal fondu. De petites quantités de manganèse et certaines impuretés comme le soufre et le phosphore peuvent également être présentes. [10]

Différents types de fonte sont produits en utilisant différentes techniques de traitement thermique et de traitement, notamment la fonte grise, la fonte blanche, la fonte malléable, la fonte ductile et la fonte graphite compactée. [10]

Tableau 2-1 : Composition chimique des fontes de première fusion

Eléments	C	Si	Mn	P	S
% en poids	3 à 4.5	2 à 3.5	0.5 à 1.2	0.05 à 1.5	≤ 0.06

Tableau 2-2 : Composition chimique des fontes brutes

Eléments	C	Si	Mn	P	S
%Poids	2.8 à 3.4	0.8 à 3	0.5 à 1	0.2 à 1.6	0.06 à 0.12

3. Propriétés mécaniques de la fonte

Les propriétés mécaniques d'un matériau indiquent comment il répond à des contraintes spécifiques, ce qui aide à déterminer son aptitude à différentes applications.

Les spécifications sont définies par des organisations telles que (ASTM) afin que les utilisateurs puissent acheter des matériaux en toute confiance qu'ils répondent aux exigences de leur application. Voici quelques propriétés mécaniques courantes de la fonte :

- Dureté - résistance du matériau à l'abrasion et à l'indentation
- Ténacité - capacité du matériau à absorber l'énergie
- Ductilité - capacité du matériau à se déformer sans fracture
- Élasticité - capacité du matériau à retrouver ses dimensions d'origine après sa déformation
- Malléabilité - capacité du matériau à se déformer sous compression sans se rompre
- Résistance à la traction - la plus grande contrainte longitudinale qu'un matériau peut supporter sans se déchirer
- Résistance à la fatigue - la contrainte la plus élevée qu'un matériau peut supporter pendant un nombre donné de cycles sans se rompre

4. Type des fontes

Classification industrielle de la fonte : on classe les fontes ou les produits moulés en fonte en six grandes familles :

4.1. Fontes blanches

Avec la bonne teneur en carbone et une vitesse de refroidissement élevée, les atomes de carbone se combinent avec le fer pour former du carbure de fer. Cela signifie qu'il y a peu ou pas de molécules de graphite libres dans le matériau solidifié. Lorsque le fer blanc est cisailé, la face fracturée apparaît blanche en raison de l'absence de graphite. [11]

4.2. Fonte malléable

La fonte blanche étant très fragile on peut la rendre malléable Un programme prolongé de

chauffage et de refroidissement entraîne la décomposition des molécules de carbure de fer, libérant des molécules de graphite dans le fer. Différentes vitesses de refroidissement et l'ajout d'alliages produisent une fonte malléable à structure microcristalline. [11]



1.1. Figure 2-1 : Structure d'une fonte malléable [13]

1.2. Fonte ductile (fonte nodulaire)

La fonte ductile, ou fonte nodulaire, obtient ses propriétés spéciales par l'ajout de magnésium dans l'alliage. La présence de magnésium entraîne la formation du graphite sous forme de sphéroïde par opposition aux flocons de fonte grise. Le contrôle de la composition est très important dans le processus de fabrication. De petites quantités d'impuretés telles que le soufre et l'oxygène réagissent avec le magnésium, affectant la forme des molécules de graphite. Différentes qualités de fonte ductile sont formées en manipulant la structure microcristalline autour du sphéroïde de graphite. Ceci est réalisé par le processus de coulée, ou par traitement thermique, en tant qu'étape de traitement en aval.

Tableau 2-4 : composition chimique des fontes ductile

Eléments	C	Si	Mn	S	P
Composition (poids %)	3.0 - 4.0	1.8 – 2.8	0.1 – 1.0	0.01 – 0.03	0.01 – 0.1

La fonte ductile produit des particules de graphite sphériques qui abaissent les concentrations de contraintes, conduisant à une fonte plus résistante et plus ductile. Lorsqu'une fissure se propage à travers la fonte ductile, la fissure rencontrera un morceau de graphite sphérique et le fond de fissure sera arrondi, empêchant la croissance de la fissure, ce qui le rend

considérablement plus ductile que la fonte grise, et même proche des propriétés mécaniques de l'acier ordinaire. La résistance de la fonte ductile la rend préférée pour les applications structurelles impliquant la fonte comme les ponts et utile dans les machines où les pièces en fonte grise peuvent tomber en panne. [13]

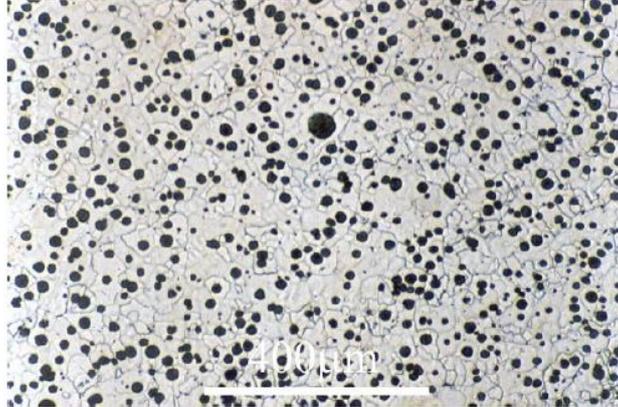


Figure 2-2: Structure d'une fonte ductile [13]

1.3. La fonte grise

Historiquement, le premier type de fonte était la fonte grise

La fonte grise est caractérisée par la forme en flocons des molécules de graphite dans le métal. Lorsque le métal est fracturé, la rupture se produit le long des flocons de graphite, ce qui lui donne la couleur grise sur la surface du métal fracturé. Le nom de fonte grise vient de cette caractéristique. La plus grande partie du carbone s'y trouve sous forme de graphite qui est une phase de carbone pur, de très faible résistance mécanique, de faible densité, Une coupe métallographique montre que le graphite se présente sous formes de lamelles, ce qui caractérise particulièrement ces fontes, et ce qui détermine leurs propriétés principales. Les plus utilisées sont les fontes hypoeutectiques, titrant de 2,4 à 3,8 % C, plus cette teneur est grande, plus il se forme du graphite et plus les propriétés mécaniques de la fonte sont faibles.

Il est possible de contrôler la taille et la structure de la matrice des paillettes de graphite pendant la production en ajustant la vitesse de refroidissement et la composition. La fonte grise n'est pas aussi ductile que les autres formes de fonte et sa résistance à la traction est également plus faible. Cependant, c'est un meilleur conducteur thermique et un niveau d'amortissement des vibrations plus élevé. Il a une capacité d'amortissement 20 à 25 fois supérieure à celle de l'acier et supérieure à toutes les autres fontes. La fonte grise est également plus facile à usiner que les autres fontes, et ses propriétés de résistance à l'usure en font l'un des produits en fonte les plus volumineux. L'amortissement des vibrations et la résistance à l'usure sont des propriétés qui en font le matériau idéal pour de nombreuses applications [10]

La morphologie des grains de graphite permet de distinguer deux types

- Les fontes grises à graphite lamellaire.
- Les fontes grises à graphite sphéroïdal.

1.3.1. Fonte à graphite lamellaire



Figure 2-3 : Structure d'une fonte à graphite lamellaire

C'est la catégorie des fontes grises la plus courante.

Le graphite de morphologie lamellaire dans ce cas, confère à ce type de fonte un certain nombre d'avantages dont les principaux se résument comme suit :

1. Excellente usinabilité,
2. Bonne résistance à l'usure,
3. Capacité d'amortissement des vibrations

Tableau 2-6 : composition chimique des fontes a graphite lamellaire

Eléments	C	Si	Mn	S	P
Composition (poids %)	3.2 à 3.5	1.8	0.5	<0.18	<0.10

2. Influence des éléments d'alliage sur les fontes

2.1. Les éléments naturels

2.1.1. Le carbone :

Le carbone a une grande affinité pour le fer, il constitue l'élément de base de la composition des fontes et des aciers. L'introduction de ferraille dans les lits de fusion nécessite souvent de

recarburer le bain par des additions de matières carbonées. La solubilité du carbone dans un bain ferreux augmente avec la température. Le carbone est gamma-gène et forme avec le fer ainsi qu'avec beaucoup d'autres éléments des carbures plus ou moins stable, métastable. Il joue le rôle déterminant dans les transformations à l'état solide.

2.1.2. Le Silicium

Le Silicium Élément normal de la fonte, il devient élément d'addition au-dessus d'une teneur de 3%. Élément alphagène, il joue un rôle fondamental en métallurgie des fontes, car, aux teneurs considérées (jusqu'à 18%), il oriente la solidification des alliages Fe-C- Si vers le système stable (graphite + ferrite). C'est un graphitisant puissant. Les Ferro-silicium, en raison probablement des faibles teneurs en aluminium et en calcium qu'ils contiennent, sont des corps inoculant. Ajoutés en petite quantité au métal liquide avant la coulée, ils produisent un effet germinateur du graphite, évanescents, qui entraîne plusieurs avantages pratiques : multiplication des cellules eutectiques, élimination des carbures, suppression du graphite de surfusion....

2.1.2.1. Influence du silicium sur la vitesse de refroidissement :

Le silicium est considéré comme un élément qui favorise la formation du graphite. L'augmentation de sa quantité diminue la quantité de cémentite en favorisant la formation du graphite. On le trouve pratiquement en teneur supérieure à 1,7% (ou 2%) dans les fontes qu'on veut obtenir (grises). Il a un effet direct sur le degré de surfusion notée ΔT , l'augmentation du taux de silicium favorise l'écart entre le point C et C', respectivement du système stable et métastable, On voit qu'il faut pour une différence entre ces deux points de l'ordre de 30 °C, un taux de silicium de 2%. Il rend la formation du carbure de fer moins probable. Il favorise la formation du graphite [18].

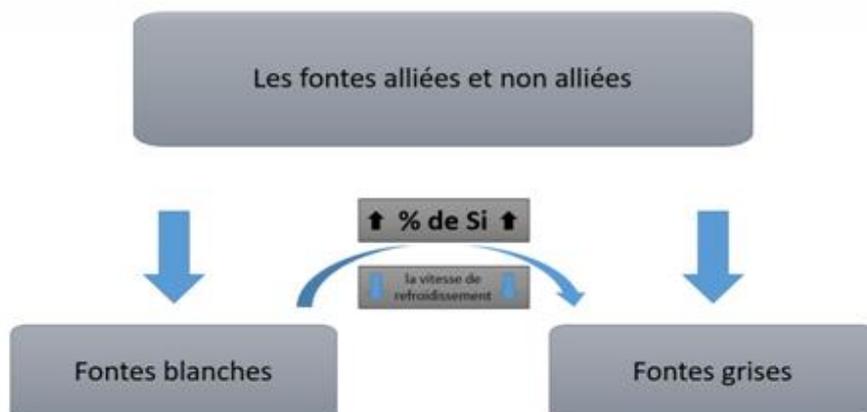


Figure 2-4 : Influence du Si sur la vitesse de refroidissement [18].

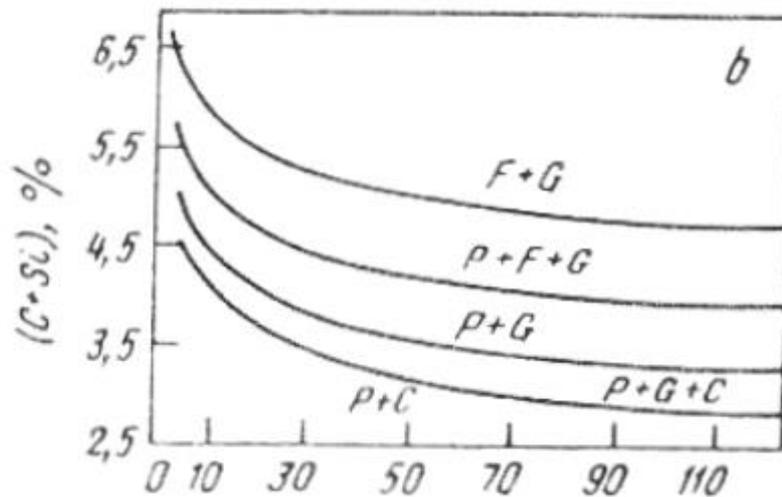


Figure 2-5 : Influence de la vitesse de refroidissement (de l'épaisseur de la pièce coulée) et de la somme C + Si sur la structure de la fonte. Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F + G)

2.1.2.2. Influence du carbone et du silicium :

Les fontes grises employées dans l'industrie ne peuvent pas être considérées comme un alliage binaire Fer-Carbone, en plus de carbone, elles contiennent d'autres éléments (Si, Mn, S, P, etc.) qui ont une grande influence sur la structure et les propriétés des fontes grises. Les deux éléments (carbone et silicium) exercent une influence directe sur le passage de système métastable au système stable [19]. Le carbone est un élément graphitisant, il favorise l'accroissement des lamelles de graphite.

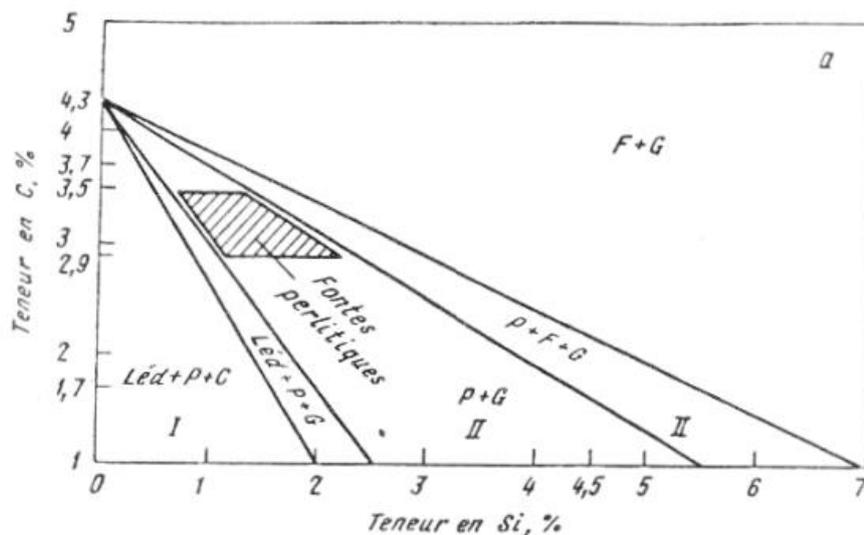


Figure 2-6 : Influence de C et Si sur la structure de la fonte Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F+G)

2.1.3. Le phosphore :

Le phosphore Elément faiblement graphitisant, le phosphore est une impureté des minerais ferreux qu'on élimine le plus possible par oxydation en présence de laitier basique. Son action fragilisant se manifeste dès la plus faible teneur dans les aciers et les fontes. Dans les fontes grises, il apparait sous forme de Fe₃C qui constitue les cristaux d'eutectique phosphoreux. En effet, pour les teneurs supérieures à 0,3 %, il se forme ainsi un réseau dur favorable à la résistance à l'usure. Si les teneurs en C et Si ne sont pas trop élevées, il améliore la coulabilité [19].

Elément faiblement graphitisant, le phosphore est une impureté des minerais ferreux qu'on élimine le plus possible par oxydation en présence de laitier basique. Son action fragilisant se manifeste dès la plus faible teneur dans les aciers et les fontes. Dans les fontes grises, il apparait sous forme de Fe₃C qui constitue les cristaux d'eutectique phosphoreux. En effet, pour les teneurs supérieures à 0,3 %, il se forme ainsi un réseau dur favorable à la résistance à l'usure. Si les teneurs en C et Si ne sont pas trop élevées, il améliore la coulabilité [19].

2.1.4. Le soufre :

Le soufre est une impureté généralement nocive qui est présent dans le minerai. Il accroît le retrait, augmente la fragilité, diminue la fluidité, accroît la ségrégation à la coulée et abaisse la tension superficielle. Il se combine de préférence au Fe et au Mn pour former respectivement de FeS et du MnS. On l'élimine 27 autant que possible des bains de fonte par réaction avec des laitiers ou des poudres basiques en milieu réducteur.



La solubilité du MnS dans le fer liquide est inférieure à celle du FeS, la présence de manganèse dans la fonte est donc favorable à la désulfuration [13].

2.1.5. Le manganèse :

Le manganèse Cet élément provient de la réduction des oxydes de manganèse contenus dans les minerais de fer, ou qui sont ajoutés à la charge pour obtenir la teneur visée. En effet, le rôle principal du manganèse est de fixer, comme on l'a vu précédemment, le soufre sous forme de MnS. L'excès de manganèse fixe le carbone sous forme de Mn₃C, carbure isomorphe de la cémentite. Ainsi, il stabilise la cémentite et la perlite. Le manganèse est aussi un élément gammagène. Il entre donc dans la composition de l'acier, des fontes alliées austénitiques ou martensitiques. Il peut accroître la tendance à certains défauts de fonderie : abreuvements, soufflures dans les fontes [18].

2.2. Les éléments d'additions :

2.2.1. Le nickel

Le nickel est l'un des éléments d'alliages les plus courants car son effet gammagène, trempant et sa miscibilité parfaite avec le fer permet de réaliser pratiquement toute la gamme des structures. Il abaisse les points critiques et les vitesses critiques au refroidissement, il permet donc une plus grande latitude dans les conditions de traitement thermique. Le nickel est graphitisant, diminue la sensibilité à l'épaisseur, affine le grain, affine la perlite et modifie la valeur de la vitesse critique de trempe. Le nickel permet par trempe de durcir les pièces moulées. En effet lorsqu'il est présent, même à des doses extrêmement faibles dans la fonte (1,5 à 4,5 mm selon l'épaisseur du moulage), le nickel donne à l'austénite, si la vitesse de refroidissement de celle-ci est suffisante, le pouvoir de se transformer en martensite. Il est donc possible d'obtenir des pièces brutes de coulée dans lesquelles, de fait de leur faible vitesse de refroidissement dans le moule, ont la structure perlitique. Ces pièces alors facilement usinables, subissent ensuite un traitement thermique approprié, qui leur confère une dureté élevée [19].

2.2.2. Le chrome

Le chrome est l'un des principaux éléments d'alliages couramment utilisés en fonderie de fonte et d'acier, c'est un élément alpha gène, augmentant la trempabilité et fortement carburigène. Au-dessus de 0,7 %, il y a trop de cémentite libre dans la fonte qui devient inusinable. Ensuite, au-dessus de 10 %, il y a formation de carbure de chrome qui ne sont pratiquement pas graphitisants. Il permet donc d'avoir des fontes réfractaires. Le chrome affine la perlite et le graphite. Les fontes et les aciers au chrome forment des familles très diversifiées. Les faibles teneurs permettent l'amélioration des caractéristiques mécaniques et facilitent les traitements thermiques. Les plus fortes teneurs leur confèrent la résistance à l'abrasion, la réfractivité et l'in oxydabilité. Le chrome est souvent associé à d'autres éléments comme le nickel, le cuivre, le titane...etc. Cet élément est relativement oxydable et des précautions doivent être prises pendant la fusion et la coulée des fontes et aciers à haute teneurs en chrome [18].

2.2.3. Le molybdène :

Le molybdène est un élément d'alliage alphas gène, antigrahitisant et fortement trempant. Il facilite la trempe bainitique et est en générale très favorable à la résistance au fluage. On l'utilise largement dans des pièces moulées destinées à des usages thermiques. Le molybdène affine la ferrite et donc la perlite et il accroît les caractéristiques mécaniques de la fonte.

2.2.4. Le cuivre

Le cuivre Il est bien connu que la solubilité du cuivre dans les fontes est limitée. Cet élément est faiblement gammagène et trempant. En solution solide dans la ferrite, il en augmente fortement la dureté en affinant le grain ferritique. Il a une action légèrement graphitisante, mais son effet n'influence que la cémentite libre et au contraire il stabilise la perlite. Le cuivre améliore donc dans les fontes les caractéristiques mécaniques, la résistance à l'usure et à certain type de corrosion. Il affine également le graphite. Il remplace partiellement le nickel (en diminuant la sensibilité à l'épaisseur) dans certaines fontes (austénitiques, martensitiques). Il est souvent associé au nickel ou au chrome pour faciliter les traitements thermiques [19].

2.2.5. Le Vanadium

Le Vanadium C'est un élément alphasagène, désoxydant actif et antigrahitisant puissant. Il forme des carbures très durs. Les carbures de vanadium, stable à hautes températures, assurent dureté et résistance à chaud. Le vanadium entre dans la composition des fontes alliées. Il est relativement oxydable, des précautions sont donc à prendre lors de l'addition et au cours des traitements thermiques. Dans les fontes non alliées, il est toujours utilisé à faible teneur (0,2% à 0,3%).

2.2.6. Le Titane :

Le titane, élément alphasagène forme des oxydes, des nitrures et des carbures. Il s'oxyde facilement à l'air et le rendement de l'addition n'est pas très régulier. Il peut aider à éliminer certains défauts dû à l'azote comme la porosité vermiculaire. Ajouté à la fonte, à des teneurs faibles (0,1% à 0,3%), c'est un élément graphitant qui a un effet très sensible sur la forme et la répartition du graphite. Il rend le graphite très fin, le dissémine dans la masse sous forme de brouillard, c'est-à-dire des pseudo-lamelles. Cela implique une augmentation des caractéristiques mécaniques ainsi que de la résistance aux chocs thermique (effet d'entaille).

2.2.7. L'Etain

C'est un métal relativement lourd, qu'on peut ajouter aux fontes grises ou au graphite sphéroïdal en faible teneur (de l'ordre de 0,1%) afin de stabiliser la perlite sans former de carbures libres. Des teneurs trop élevées en étain risquent de détériorer la forme du graphite lamellaire et de provoquer la dégénérescence du graphite sphéroïdal.

2.2.8. L'Aluminium

Elément graphitant, un effet germinateur du graphite pendant le recuit lui est assigné en fonderie

de fontes malléables. Il est généralement présent dans les Ferro-siliciums et autres ferro-alliages. Il diminue la profondeur de trempe. Le plomb, pratiquement insoluble dans les alliages ferreux, est un élément poison même à l'état de traces. Il perturbe gravement la forme du graphite lamellaire et surtout sphéroïdal. Il provient essentiellement de matières récupérées comme la peinture sur les tôles, l'acier de décolletage ou encore les pièces émaillées [18].

2.2.9. Le Tellure

L'emploi du tellure est assez délicat (influence de la température, toxicité des vapeurs). Il est ajouté à l'état de traces dans les fontes afin d'inhiber la germination du graphite primaire dans les fontes malléables. C'est un puissant antigraphitisant. On l'utilise parfois sous forme d'enduits [19]. C'est un métal ultra léger, très volatil et réagissant très vivement avec l'oxygène et le soufre. C'est donc un agent de traitement utilisé pour la désoxydation, la désulfuration et surtout pour l'obtention du graphite sphéroïdal des fontes. Il peut être ajouté à l'état métallique pur, mais à condition d'employer des dispositifs spéciaux évitant les réactions explosives. On peut aussi modérer sa réactivité en l'utilisant sous forme d'alliages de magnésium plus denses.

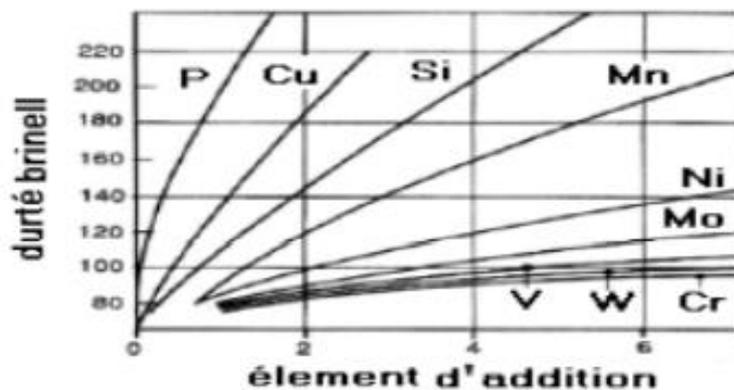


Figure 2-7 : Influence de quelques éléments sur la dureté de la ferrite [13]

2.2.10. Dureté des fontes

Sauf éventuellement dans les régions trempées superficiellement, la dureté des fontes grises est mesurée suivant la norme NF A 03-201 Essai de dureté Brinell pour la fonte grise (août 1967).

Le symbole normalisé est HB (suivi éventuellement de trois nombres rappelant

Les conditions particulières de l'essai). La norme précise que la charge doit être maintenue pendant $15 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ et que la distance du centre d'une empreinte au bord de la pièce à essayer doit être au moins égale à 2,5 fois le diamètre de l'empreinte ; les centres de deux empreintes doivent être espacés d'au moins 4 fois leur diamètre.

La dureté des fontes non alliées varie dans des proportions très importantes en fonction de la structure :

- fontes blanches : 400 à 550 HB suivant la teneur en carbone.
- fontes grises perlitiques : 170 à 270 HB suivant la finesse de la perlite.
- fontes grises ferritiques : 100 à 150 HB.
- fontes grises martensitiques : 400 à 500 HB.
- fontes grises bainitiques : 300 à 400 HB.

La dureté globale de la fonte dépend évidemment avant tout de la matrice dont la dureté propre varie dans des proportions considérables, même dans le cas de fontes non alliées à l'état brut de coulée :

- dureté de la ferrite : 90 à 150 HB dans les fontes non alliées.
- dureté de la perlite : 200 à 300 HB suivant sa finesse).

La dureté d'une fonte est complètement indépendante du graphite, ce dernier agit par sa quantité et par ses dimensions (relatifs à des fontes à graphite lamellaire ferritiques).

La dureté est souvent déterminée pour apprécier la résistance à l'usure et l'usinabilité et la résistance à l'usure. C'est pourquoi l'annexe A de la norme NF A 32-101 indique une méthode pour la classification des pièces moulées en fonte grise par la dureté Brinell [23].

Tableau 2-8 : Dureté Brinell d'échantillons, à l'état brut de coulée et traités (ferritiques), en fonction du diamètre des barreaux coulés.

Structure	Diamètre du barreau (mm)	Dureté Brinell					
		Nuance I (1)		Nuance II (1)		Nuance III (1)	
		Brut de coulée	Matrice ferritique	Brut de coulée	Matrice ferritique	Brut de coulée	Matrice ferritique
Graphite très grossier ↓ Graphite fin	90	177	99	193	109	145	129
	50	197	102	211	121	159	131
	32	212	107	229	131	175	152
	22	223	111	241	131	197	161
	15	246	129	257	145	218	171
	10	288	133	285	152	256	188
(1) Composition chimique (en %) des divers échantillons :							
		C	Si	Mn	S	P	
	nuance I	3,10	2,79	0,67	0,08	0,18	
	nuance II	3,04	2,88	0,73	0,05	0,98	
	nuance III	3,33	2,86	0,76	0,08	0,18	

*Chapitre 3 Techniques
expérimentales*

1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la partie expérimentale de notre travail. Les étapes de la réalisation de ce travail sont détaillées. Les différents moyens et techniques expérimentaux utilisés dans cette étude sont décrits dans cette section.

2. Les substrats

Les substrats concernés par cette étude est un fonte grises (Ft 25), sous forme de cylindrique de L'épaisseur est de 8 mm qui est très pratique pour réaliser nos revêtements

2.1. Fonte grise : (Fonte à graphite lamellaire ft25)

C'est la catégorie des fontes grises la plus courante.

Le graphite de morphologie lamellaire dans ce cas, confère à ce type de fonte un certain nombre d'avantages dont les principaux se résument comme suit:

4. Excellente usinabilité,
5. Bonne résistance à l'usure,
6. Capacité d'amortissement des vibrations

3. La poudre

La poudre utilisée dans le cadre de ce projet a été choisie à partir d'une poudre améliorée parmi celles disponibles au laboratoire LTSM, et ce pour leurs propriétés très intéressantes.

- Poudre d'un alliage Ni-B-Si désignée Chrometec 10680 selon la désignation du producteur Castollin Eutectic.
- Poudre d'un alliage Ni-Cr-B-Si-Fe nommé sous Eutalloy® Tungtec 10112 selon la désignation du producteur Castollin Eutectic.
- Poudre d'un alliage Ni-Cr-Fe nommé sous RW 12496 selon la désignation du producteur Castollin Eutectic.
- Poudre d'un alliage Ni-Al-Mo nommé sous RotoTec 51000 selon la désignation du producteur Castollin Eutectic.

Les propriétés et la nature chimique de poudre utilisées dans le cadre de ce projet ont été relevées à partir des documents des fabricants, ils sont regroupés dans le tableau 3.1 qui suit :

Tableau 3.1 : Poudres utilisées dans la projection thermique

Poudre	Reference	Composition	Dureté	Temp. Max de service
Chrometec	10680	Alliage de Ni-B-Si.	200 - 240 HV30	600°C
Tungtec	10112	Alliage Ni-Cr-B-Si-Fe + WC	59 - 63 HRC 60% de carbures WC	700°C
Frixtec	19850	Alliage Cu-Al	100 - 120 HV10	
Lubrotec	19985	Alliage Ni-Cr-Fe	170 - 205 HV10	
Eutalloy RW	12496	Alliage Ni-Cr-B-Si-Fe	620 - 685 HV30	700°C
Roto Tec	51000	Alliage Ni-AL-Mo	165 HV10	

Découpage des échantillons

Des échantillons sous forme de cylindrique d'une fonte grise au carbone de diamètre 40 mm et de 8 mm d'épaisseur. Les échantillons ont découpé à l'aide d'une scie mécanique montrée à la figure 3.1.



Figure 3-1 : Scie mécanique

4. Préparations des pièces à projetées

4.1. Grenailleuse

L'augmentation de la rugosité de surface est obtenue par un lancement à grande vitesse des grains d'alumine (Al_2O_3) contre l'échantillon à l'aide d'air comprimé sous une pression de 8 bars. La figure 3.2 montre la grenailleuse de marque Airblast du LTSM.



Figure 3-2 : grenailleuse

4.2. Torche Eutalloy (super Jet-S) :

Une torche à flamme de type fusion-refusion de CastollinEutectic désigné par Eutalloy Super Jet à été utilisé pour l'exécution des revêtements sur les substrats en fonte. La figure 3.3 montre la torche dans sa valise et en action au laboratoire LTSM.



Figure 3-3 : Torche à refusion Eutalloy

Les paramètres de projection utilisés lors de la projection sont présentés dans le tableau 3.2 ci-dessous :

Tableau 3.2 : Les paramètres de la projection fusion – refusion.

Oxygène	90 à 1200 NI/h à 2.5 bars
Acétylène	80 à 1100 NI / h à 0.5 bar
Distance de projection	30 – 40 mm
Angle de projection	75°
Distance de la refusion	15 – 20 mm
Angle de refusion	45°

La technique de projection est décrite comme suit :

Afin d'assurer une bonne adhérence du dépôt au substrat un préchauffage de la surface du substrat a été effectué jusqu'au bleu par un passage de la torche sans apport de poudre.

Projection thermique de la poudre par un balayage de toute la surface du substrat par la torche à flamme.

Refusion du revêtement déposé (certains dépôts) par un repassage avec la torche (sans apport de poudre) sur le substrat afin de fusionner la matrice.

5. Traitements thermiques

Nous avons effectué des traitements thermiques, de 4 échantillons, à une température de chauffage de 900 °C dans un four de marque Nabatherm du laboratoire LTSM.



Figure 3-4 : Four de traitement thermique

On allume le four et on attend que la température désirée est atteinte. On introduit les échantillons dans le four pour 30 minutes. Les échantillons sont retirés par la suite et selon le cas projeté sont soit plongé dans l'eau, l'huile ou laissé refroidir à l'air ou dans le four.

Trempe après chauffage à la flamme :

Ce procédé consiste à chauffer localement la surface des pièces et à la refroidir brusquement de manière à obtenir une couche durcie sans affecter l'intérieur de la pièce. Dans notre cas, c'est la torche Eutalloy qui a été utilisée comme chalumeau. L'éprouvette était mise en rotation manuellement durant l'opération de chauffe afin d'homogénéiser la montée en température. Un thermomètre à infrarouge contrôlait la température atteinte. Ensuite, la pièce est plongée dans un grand bidon d'eau ou d'huile d'automobile.

6. Le polissage

Les échantillons ont subi un polissage au papier abrasif comportant trois stades :

6.1. Le polissage grossier

Cette opération s'effectue manuellement avec des disques tournants en carbures de silicium (papiers abrasifs de 80, 280, 400, 600, 800, 1000 et 1200), à l'eau courant comme un lubrifiant. La figure 3.4 montre la polisseuse utilisée au niveau de laboratoire de SDM.



Figure 3-5 : Polisseuse

6.2. Le polissage définition

Un polissage de finition très fin avec une poudre d'alumine Al_2O_3 ayant une granulométrie de $0.3\mu m$, en suspension sur un tissu en soie. Représente la polisseuse de finition montrée à la figure 3.5.



Figure 3-6 : polisseuse de finition.

7. Attaque chimique

L'attaque chimique provoque une dissolution différentielle des phases suivant leur nature et leur composition. Le seul réactif que nous avons utilisé et le meilleur adapté aux échantillons de notre étude est le Nital à 2% (2 ml de HNO₃ + 100 ml de l'eau distillée), il permet la révélation des joints de grains ferritiques, perlitiques, et les interfaces.

Analyse micrographique (Microscope optique)

L'examen micrographique a pour but principal la mise en évidence de la structure de l'échantillon. Un microscope métallographique de type Axiovert de Carl Zeiss du laboratoire LTSM a été utilisé pour l'observation de nos échantillons. Ce microscope est muni d'une caméra numérique permettant le transfert des images vers un PC. La figure 3.6 montre une photo du microscope optique utilisé.



Figure 3-7 : microscope optique

8. L'essai de dureté

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet d'une norme précise. Dans notre cas l'essai de la dureté a été effectués avec un duromètre Buehler montré à la figure 3.7. La micro dureté a été mesurée avec un appareil de marque INOVATEST.



Figure 3-8 : duromètre Buehler



Figure 3-9 : Micro duromètre Inovatest

*CHAPITRE 4
RÉSULTATS ET
INTERPRÉTATION*

4.1 Introduction

Les fontes grises à graphite lamellaire caractérisées par une bonne résistance à l'usure et un bas coefficient de frottement utilisées dans la majorité des cas en construction mécanique sont parfois exposées à quelques conditions de service très exigeantes, comme l'usure abrasive et la corrosion. On a alors recours à des traitements de surface pour accroître leur résistance mécanique.

Ce présent travail a comme objectif principal l'étude des effets de différents traitements thermiques ou de surface pour améliorer davantage les propriétés d'anti-usure et électrochimiques des fontes grise.

Cette étude est divisée en plusieurs volets. Il y a d'abord les traitements thermiques classiques, puis le traitement superficiel et enfin les dépôts de revêtements par projection thermique.

4.2 Fonte grise FT25 à la réception

Le matériau initial réceptionné était sous forme d'une barre de 60 mm. Nous avons découpé une rondelle et elle a été polie métallographiquement pour être observée au microscope optique. La figure 4-1 montre sa microstructure attaquée au Nital.

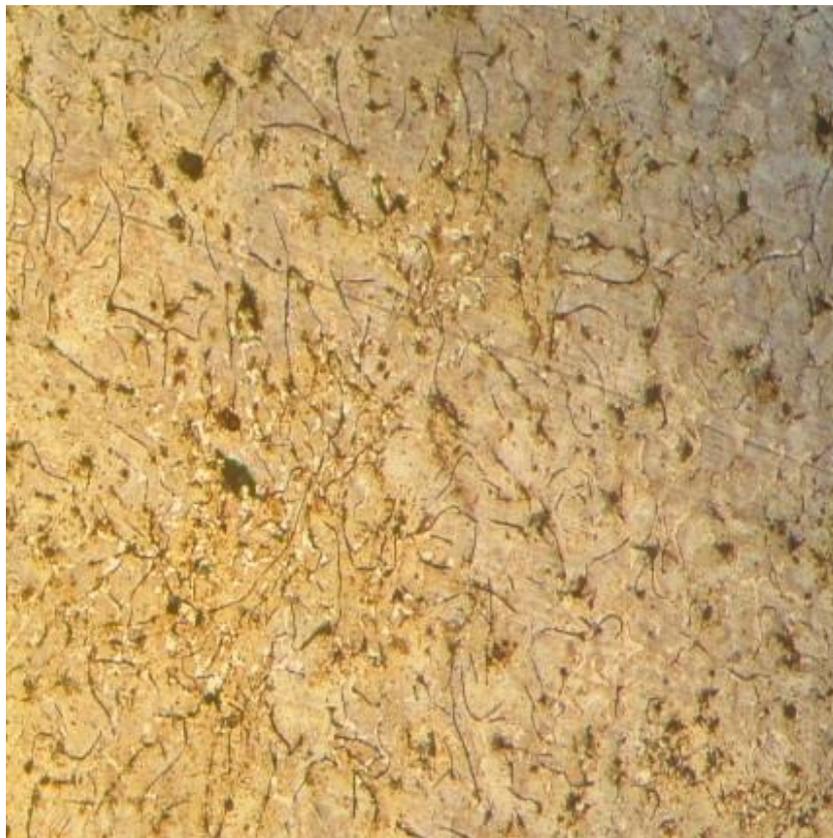


Figure 4-1 : Microstructure de la fonte FT25 à la réception.

A titre comparatif, voici une microstructure similaire (figure 4.2) que l'on retrouve dans la bibliographie.

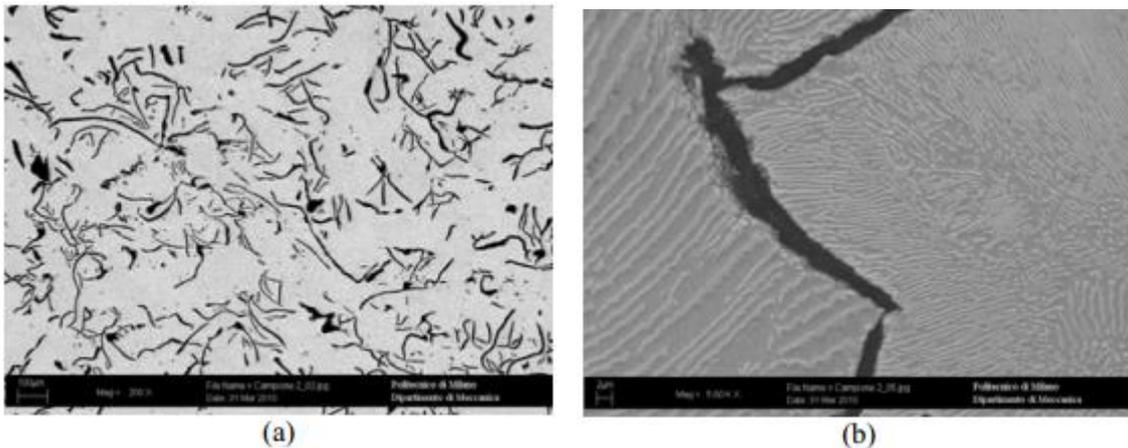


Figure 4-2 : Microstructure de la fonte grise FT25 selon la bibliographie [1]

La composition moyenne d'une fonte grise FT25 est donnée à titre indicatif par le tableau 4.1 [1]. A fort grossissement au microscope électronique à balayage, la présence d'une structure perlitique devient évidente.

Tableau 4-1 : Composition chimique d'une fonte FT25

C	Si	Mn	P	S
3 – 3.2	1.5 – 1.8	0.7 – 0.9	< 0.15	< 0.12

Selon la norme ASTM A247, le graphite est de type A. Il est caractérisé par une distribution aléatoire mais uniforme dans toute la microstructure.

Dans le cas de la fonte FT 25 qui est une fonte hypoeutectique, seuls les cristaux primaires d'austénite précipitent à partir de la fonte lorsque la ligne de liquidus est atteinte. Cela augmente la teneur en carbone dans la masse fondue résiduelle. Une fois que la teneur en carbone a finalement atteint 4,3 % à 1147 °C, la masse fondue résiduelle cristallise à température constante pour former l'eutectique (lédéburite-I). Immédiatement après la solidification, la microstructure se compose de l'eutectique et des cristaux d'austénite préalablement précipités principalement. L'austénite primaire et les cristaux d'austénite contenus dans la lédeburite-I précipitent la cémentite au fur et à mesure que le refroidissement progresse en raison de la solubilité décroissante du carbone. Par conséquent, la microstructure dans cet état est constituée de lédeburite-I et de l'austénite primaire noyée dans celle-ci ainsi que de la cémentite précipitée. A 723 °C, la composition eutectoïde dans les cristaux d'austénite est finalement atteinte (tant dans les cristaux primaires que dans l'eutectique). Alors que la lédeburite-I se transforme en lédeburite-II, les grains d'austénite primaires se transforment en grains de perlite. Par conséquent, la microstructure de la fonte hypoeutectique est constituée de lédeburite-II avec les grains de perlite incrustés dans celle-ci et de la cémentite préalablement précipitée des cristaux d'austénite [2].

La micro dureté mesurée pour la fonte FT25 telle que reçue est de 155 HV₁₀. La microstructure

et la micro dureté serviront de référence pour les changements éventuels qui se produiront durant les différents traitements thermiques et de surface que subira notre fonte grise FT25.

4.3 Les traitements thermiques

Traitement thermique d'une pièce consiste à lui faire subir des transformations de microstructure grâce à des cycles de chauffage et de refroidissement afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques : dureté, ductilité, limite élastique. Nous avons donc réalisé une mise en solution à 900 °C, suivi d'un maintien de 30 minutes ensuite l'éprouvette est refroidie rapidement à l'eau, à l'huile, à l'air ou laissée dans le four.

4.3.1 Trempe à l'eau

Nous avons chauffé les échantillons dans le four électrique à la température de 900 °C avec un temps de maintien de 30 min. Ensuite, les échantillons sont plongés immédiatement dans un grand bidon d'eau. L'observation d'un échantillon après préparation métallographique et attaque chimique nous donne la microstructure montrée à la figure 4.3.

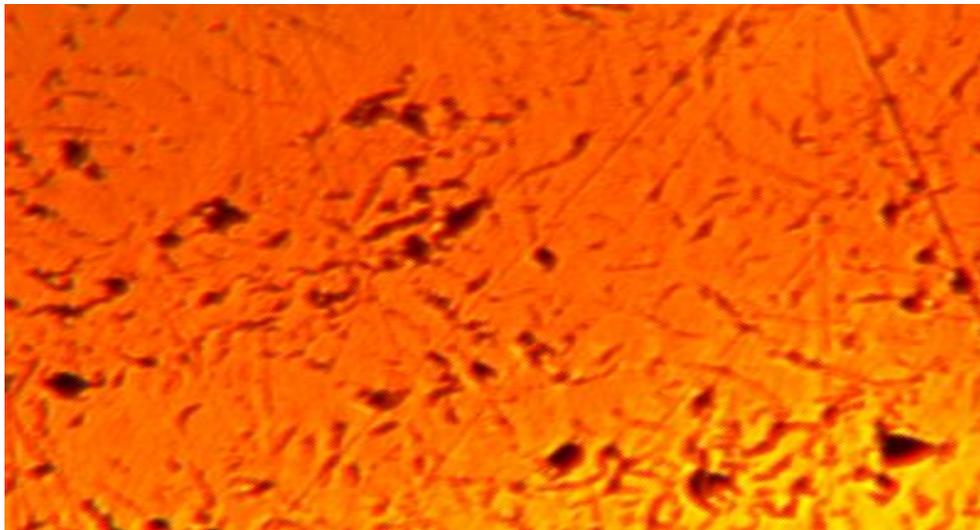


Figure 4-3 : Microstructure d'une fonte FT25 après trempe à l'eau (100X)

Malheureusement la qualité du polissage n'est optimale. L'absence d'un polissage avec une poudre d'alumine jusqu'à 0.05 μm ne permet pas d'obtenir une belle photo. De plus, la caméra numérique montée sur le microscope optique a une faible résolution. Selon la norme ASTM A247, le graphite est de type A et B. Il est caractérisé par une distribution aléatoire de (type A) et d'une distribution en rosette (type B) dans toute la microstructure.

Dans ce cas, la dureté reste pour nous un bon indicateur quant à la présence éventuelle d'une microstructure particulière. La dureté mesurée sur cet échantillon s'élève à 57.8 HRC. Il est donc fort probable que nous avons la formation d'une martensite.

La visualisation de la microstructure dans l'appareil de micro dureté montre la présence de parties blanches qui sont probablement de la fonte blanche.

4.3.2 Trempe à l'huile

Comme pour la trempe à l'eau, nous avons chauffé les échantillons dans le four électrique à la température de 900 °C avec un temps de maintien de 30 min. Ensuite, les échantillons sont plongés immédiatement dans un grand bidon d'huile de moteur (15W40). L'observation d'un échantillon après préparation métallographique et attaque chimique nous donne la microstructure montrée à la figure 4.4.

Selon la norme ASTM A247, le graphite est de type A et B. Il est caractérisé par une distribution aléatoire de (type A) et d'une distribution en rosette (type B) dans toute la microstructure.

La dureté mesurée sur cet échantillon s'élève à 39.5 HRC. Il est donc fort probable que nous avons la formation d'une bainite.

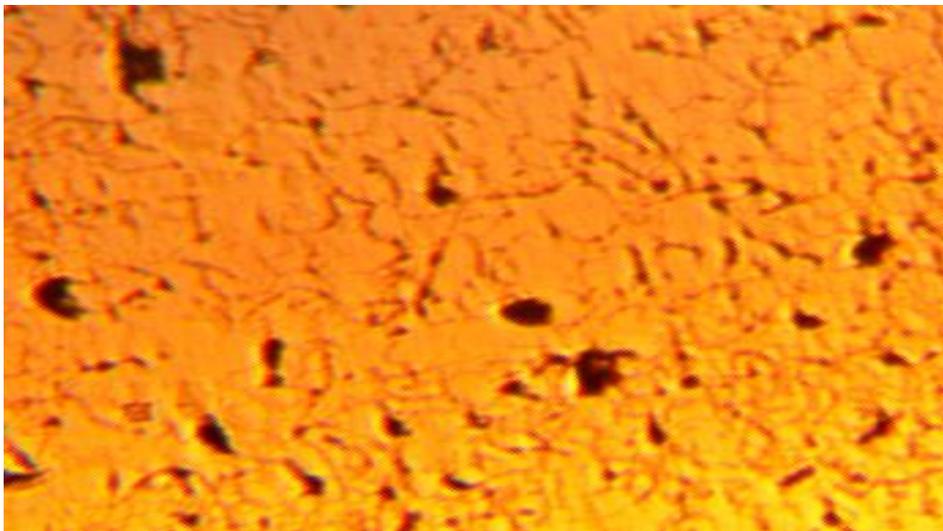


Figure 4-4 : Microstructure d'une fonte FT25 après trempe à l'huile (100X).

4.3.3. Refroidissement à l'air libre

Nous avons chauffé les échantillons dans le four électrique à la température de 900 °C avec un temps de maintien de 30 min. Ensuite, les échantillons sont sortis et laissés refroidir à l'air libre jusqu'à la température ambiante. C'est l'équivalent d'un traitement thermique de normalisation.

Des températures de normalisation élevées augmentent la solubilité du carbone dans l'austénitique (c'est à dire le volume de cémentite dans la perlite résultante). Un volume de cémentite plus élevé, à son tour, augmente à la fois la dureté et la résistance à la traction. La composition de l'alliage d'une fonte grise influence également la solubilité du carbone dans l'austénite. Certains éléments augmentent la solubilité du carbone, certains la diminuent et d'autres n'ont aucun effet sur lui. La teneur en carbone de la matrice est déterminée par les effets combinés des éléments d'alliage [3].

La figure 4.5 montre une photo de sa microstructure.

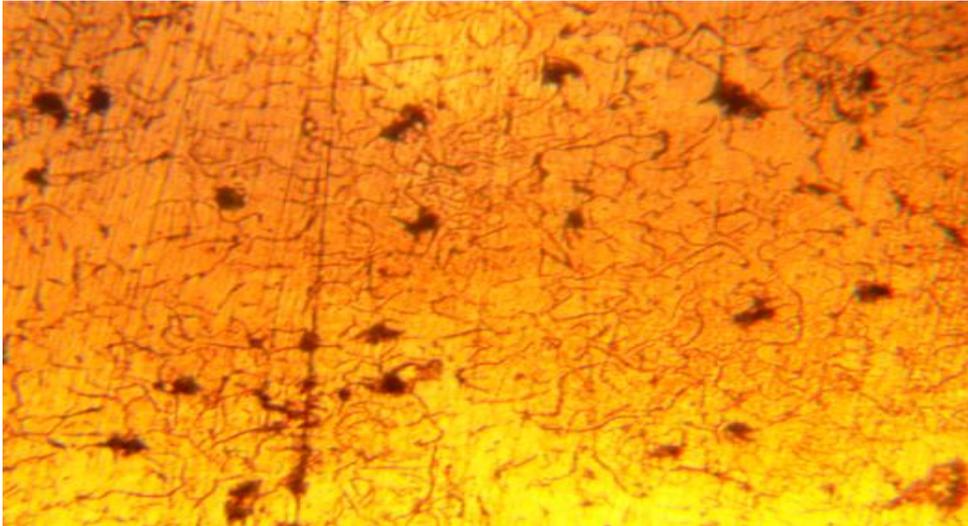


Figure 4-5 : Microstructure de la fonte grise FT25 refroidie à l'air (100X).

Selon la norme ASTM A247, le graphite est de type A et B. Le type B est prépondérant dans toute la microstructure. Les essais de dureté ont donné une dureté moyenne de 42.7 HRC. Cette légère augmentation de la dureté par rapport aux échantillons trempés dans l'huile réside dans la finesse de la perlite qui améliore en général la résistance à la traction et les propriétés mécaniques en général.

4.3.5. Traitement thermique refroidissement au four

Cette opération consiste à un chauffage à température élevée (900 °C) avec un temps de maintien de 30 min. Ensuite, la pièce est refroidie à l'intérieur du four éteint jusqu'au lendemain (24h). La figure 4.6 montre une photo de sa microstructure.

La résolution du microscope est très faible à un grossissement de 100 X. Il est probable que la microstructure soit un mélange de perlite grossière et un peu de ferrite. Le graphite est de type A. La mesure de la dureté a donné une valeur de 20HRC

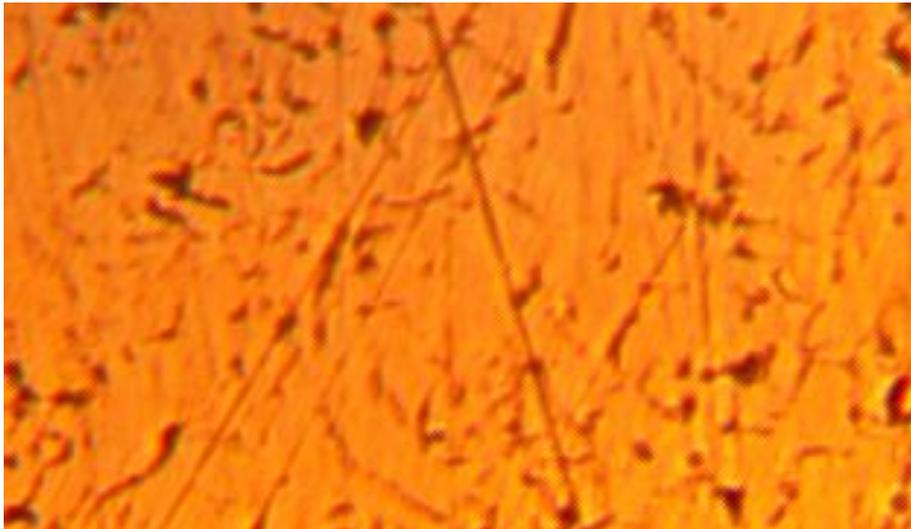


Figure 4-6 : Microstructure de la fonte FT25 chauffé à 900 °C et refroidie au four (100X)

4.4. Les traitements superficiels

La trempe à la flamme de pièces en matériaux ferreux sert à prévenir l'usure. Elle prolonge considérablement la durée d'utilisation de ces pièces, en particulier celle des organes d'entraînement comme les roues d'engrenage ou les bagues de roulement. A l'aide d'un chalumeau à flamme, la pièce est chauffée uniformément en la faisant jusqu'elle se transforme en une masse rouge. Un thermomètre à infrarouge permet de contrôler la température désirée. La pièce est ensuite refroidie par de l'eau ou de l'air sortant d'un tube circulant entourant la pièce. Dans notre cas, nous l'avons simplement plongé soit dans un grand bidon d'eau ou dans un grand bidon d'huile d'automobile. Les résultats de l'observation au microscope optique sont montrés dans les figures 4.7 et 4.8.

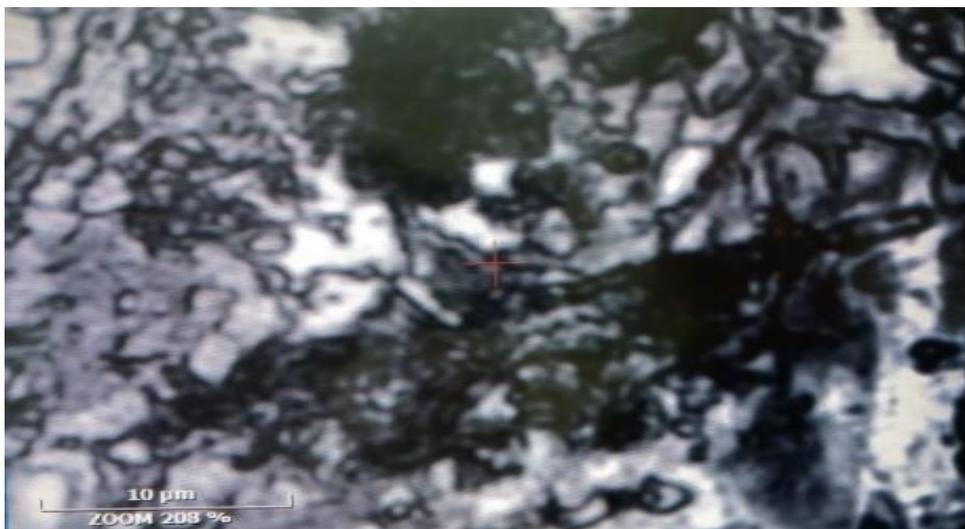


Figure 4-7 : Trempe à huile après chauffage au chalumeau d'une fonte FT25 (200X).

Pour le traitement au chalumeau suivi d'une trempe à l'huile, on distingue clairement la structure perlitique de l'échantillon. Sa finesse est remarquable. Il y a la présence de cellules eutectiques ainsi des zones éparses de lédeburite eutectique (austénite + cémentite).

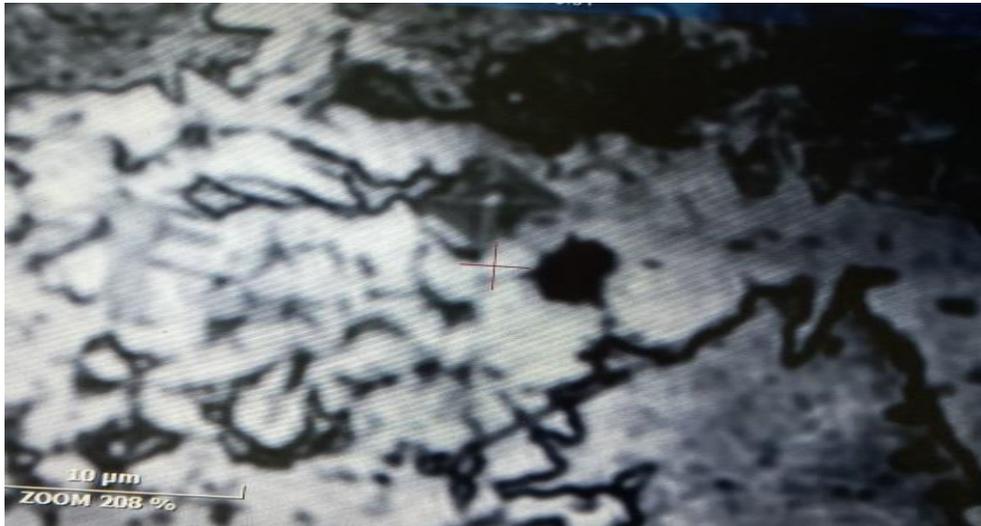


Figure 4-8 : Trempe à L'eau après chauffage au chalumeau d'une fonte FT25 (200X).

Pour le traitement au chalumeau suivi d'une trempe à l'eau, il y a formation d'une fonte blanche hypoeutectique parsemée de cellules eutectiques. Une idée généralement acceptée est que les cellules eutectiques se forment librement dans le liquide, un peu avant le front de solidification. La macro image de la figure 4.9 est une représentation de ce phénomène. Dans des conditions de refroidissement rapide, de nombreuses et petites cellules eutectiques peuvent être trouvées, mais aussi d'autres cellules en petites quantités mais très grandes en taille [4].

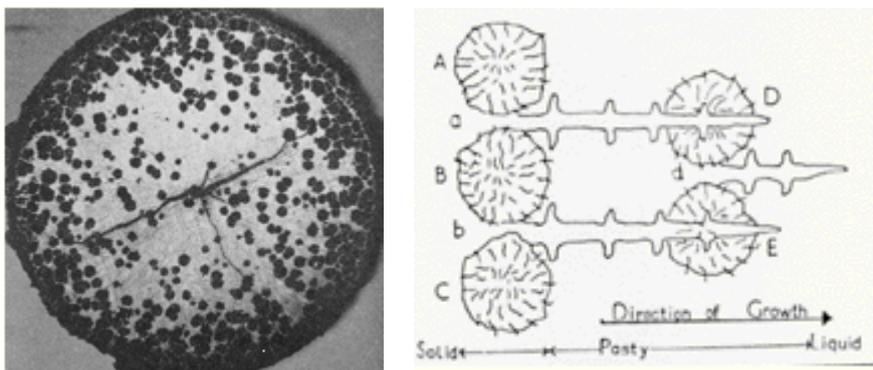


Figure 4-9: Formation des cellules eutectiques initiées par des dendrites austénitiques [4]

L'austénite sous forme de grosses dendrites est présente bien avant que la formation de colonies eutectiques ne soit initiée par la nucléation du graphite.

Les duretés des échantillons issus de ces deux traitements superficiels sont respectivement de:

52.5 HRC pour la trempe à l'eau

42.5 HRC pour la trempe à l'huile.

Nous avons inspecté scrupuleusement l'état des deux échantillons après trempe et nous n'avons pas constaté l'apparition de fissures dans la masse ni en surface. Il faut noter qu'avec de telles duretés, les pièces en fonte doivent être usinées avant de subir la trempe superficielle.

4.5 Les revêtements par projection thermique

Pour la projection de nos dépôts, nous avons utilisé quatre poudres commerciales de Castolin Eutectic : (Chrometec10680, Tungtec 10112, Rototec 19985 + 51000). Pour des raisons pratiques nous avons découpé les rondelles d'échantillons en deux pour pouvoir facilement prendre les mesures de micro duretés sur leur partie transversale. L'aspect macroscopique des éprouvettes ainsi déposées est à la figure 4.9. Les surfaces des revêtements ont un aspect lisse mais gondolé. Ceci est dû à la nature même du procédé de projection.

4.5.1 Revêtement Chrometec

La figure 4.10 représente le dépôt Chrometec sur un échantillon en fonte FT25. Le revêtement se distingue par la présence de carbures de chrome noyés dans une matrice de NiCr. A l'interface, il y a présence de carbures très petits parsemés le long de la frontière dépôt-fonte. Le revêtement a une dureté de 242 HV₁₀ qui est une valeur normale.

La fonte FT25 est caractérisée par la présence de graphite sous forme de rosettes donc de type B. Il y a probablement une structure perlitique fine juste en dessous du revêtement. Ensuite ; nous retrouvons la structure classique de la fonte grise.

Il est donc intéressant de noter que l'ajout de la Chrometec ne perturbe pas la microstructure de la fonte grise et permet de contribuer à une meilleure tenue de la fonte FT25 à la résistance à la chaleur et à une très bonne résistance à la corrosion. Nous pouvons conclure que l'emploi du revêtement Chrometec sur une fonte grise sera bénéfique pour les propriétés recherchées que nous venons de citer. Le revêtement refroidi à l'air comprimé est semblable à celui refroidi à l'air. Il est donc préférable de ne pas utiliser l'air comprimé pour éviter contrainte supplémentaire sur la pièce notamment celle qui est massive.

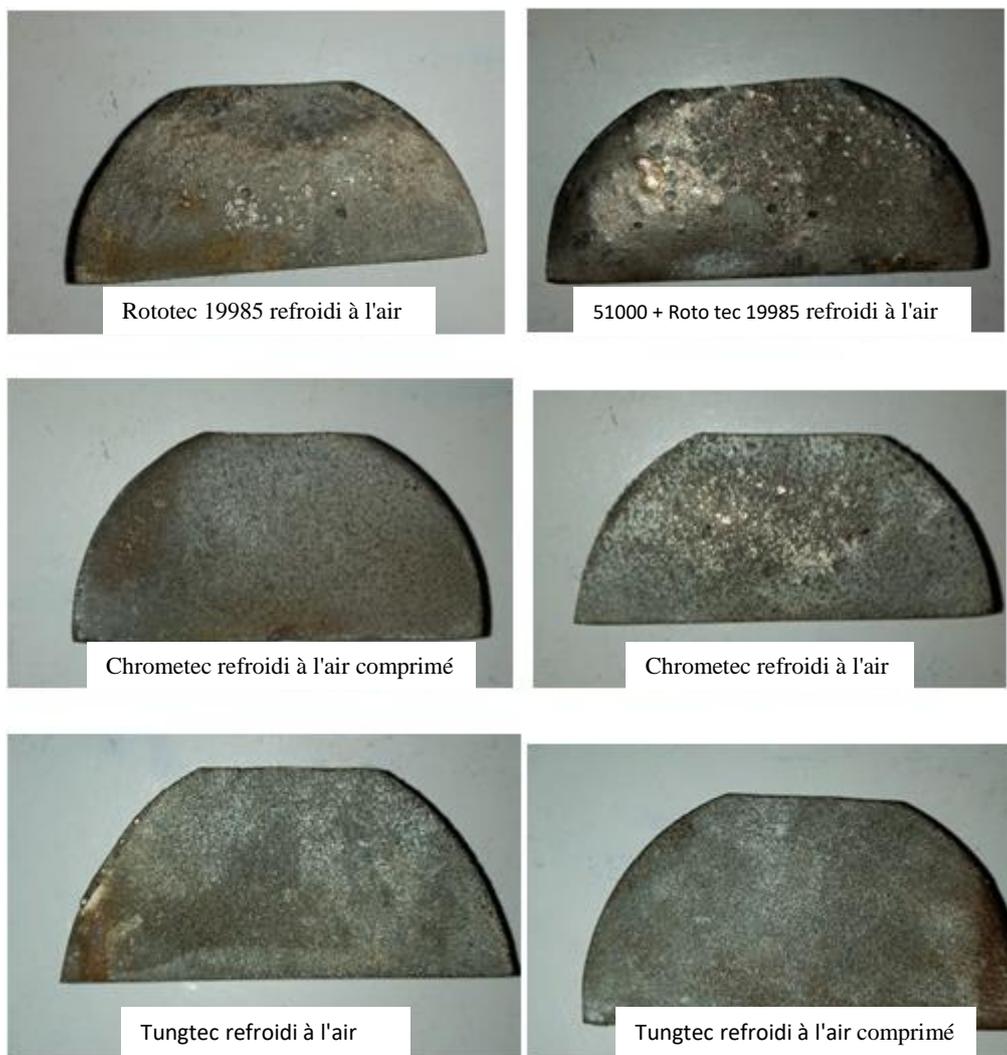


Figure 4-10: Aspects des surfaces des revêtements déposés par l'Eutalloy.

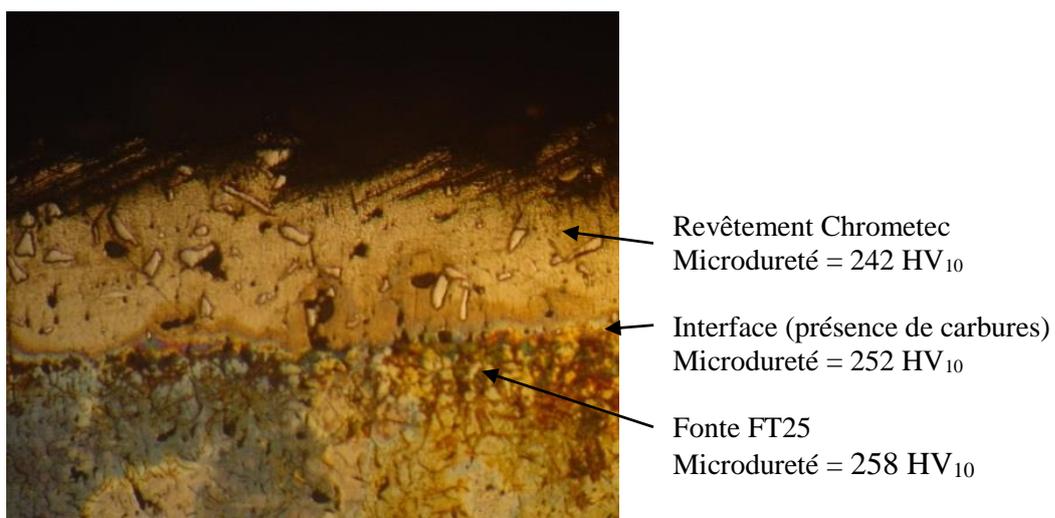


Figure 4-11: Dépôt Chromotec refroidi à l'air sur fonte FT25.

4.5.2 Revêtement Tungtec

La figure 4.12 représente le dépôt Tungtec sur un échantillon en fonte FT25. Le revêtement se distingue par la présence de carbures de chrome noyés dans une matrice de NiCr. A l'interface, il y a présence de carbures très petits parsemés le long de la frontière dépôt-fonte. Le revêtement a une dureté de 242 HV₁₀ qui est une valeur normale.

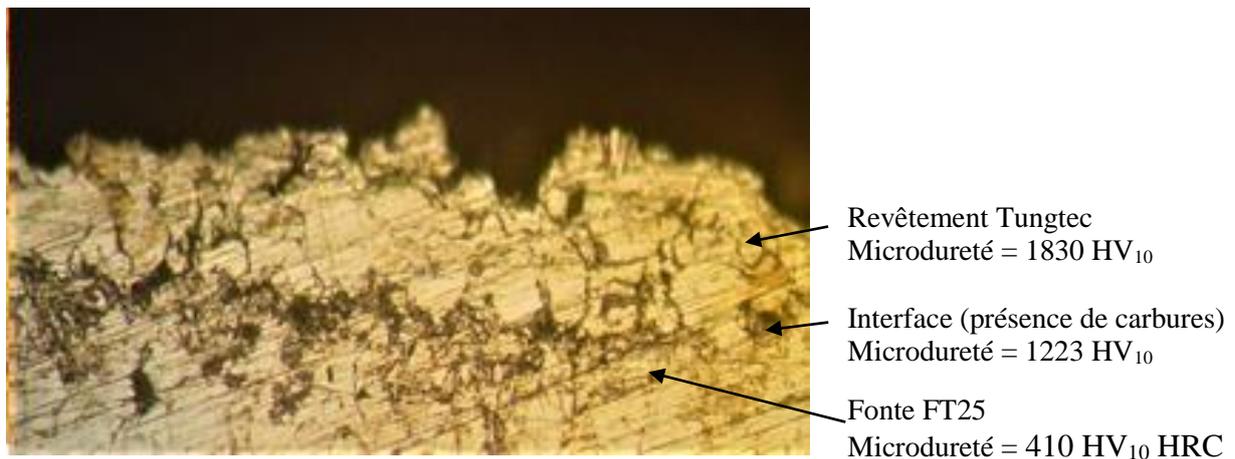


Figure 4-12: Dépôt Tungtec refroidi à l'air sur fonte FT25.

Dans ces expériences, il est évident que le revêtement Tungtec a une influence plus marquée sur la microstructure de la fonte FT25. La principale raison est sa technique de déposition est plus élaborée que celle de la Chrometec. La refusion des carbures WC dans leur matrice prend plus de temps et par conséquent affecte thermiquement la microstructure de la fonte grise. Nous voyons qu'à l'interface, il y a présence de cellules eutectiques et que juste en dessous, il y a présence de fonte blanche hypoeutectique. La présence de cette dernière a fait augmenter la microdureté à plus de 410 HV₁₀.

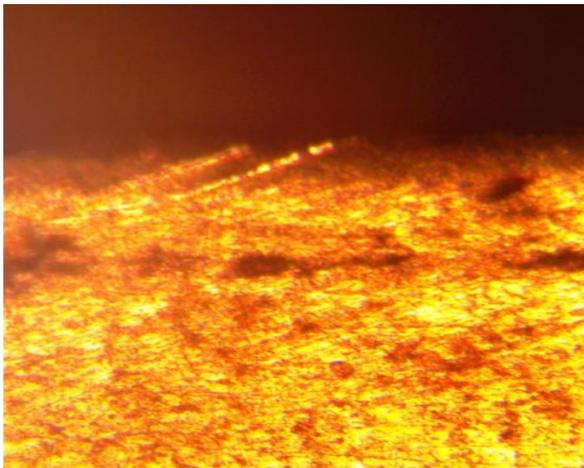
Les étapes caractéristiques de la transformation des fontes blanches hypoeutectiques :

- austénite primaire + liquide
- austénite + lédéburite
- Cémentite (proeutectoïde) + Perlite + Lédéburite transformée (globules d'austénites (-> perlite) dans cémentite).

4.5.2 Revêtement Rototec 12496 avec ou sans la 51000

La figure 4.13 montre le dépôt fabriqué à partir de la poudre RW12495 sur un échantillon en fonte FT25 avec 3 passes. Le revêtement se distingue par la présence de carbures de chrome

noyés dans une matrice de NiCr. La mauvaise résolution rend difficile l'interprétation des microstructures.



Revêtement RW12496
Microdureté = 1410 HV₁₀

Interface (présence de carbures)
Microdureté = 572 HV₁₀

Fonte FT25
Microdureté = 378 HV₁₀

Figure 4-13 : Dépôt Rototec 12496 refroidi à l'air sur fonte FT25.

Dans ces expériences, nous avons utilisé la poudre RW 12496 qui est un alliage applicable en projection avec refusion avec les procédés RotoTec 80 et Castodyn DS 8000. Grâce à ses caractéristiques mécaniques (excellente résistance au frottement métal/métal et bon maintien de la dureté à hautes températures, Eutalloy RW 12496 est un produit particulièrement indiqué pour le reconditionnement ou le traitement préventif des galets de guidage et de formage, les tambours de tréfileries, les chemises d'arbres, les presse-étoupe, les cylindres, ... De plus, il offre une bonne résistance à l'oxydation et à la corrosion, y compris en immersion dans de l'eau de mer[5]. Cette poudre est recommandée pour son emploi avec les substrats en fonte. Le revêtement déposé a un aspect plus lisse et homogène que ceux des Chrometec et Tungtec.

Il est important de souligner que dans ces expériences, la déposition s'est faite en deux stades. Un premier stade ou la sous couche d'accrochage, la poudre 51000 a été déposée avec la torche DS8000 en trois passes, ce qui donne une épaisseur d'environ de 180 µm. Ensuite, le revêtement Eutalloy RW 12496 est déposé avec la torche Eutalloy avec refusion avec trois et cinq passes. La différence de passes ou d'épaisseur a un intérêt sur l'apport thermique sur le substrat et par conséquent son influence sur la microstructure du substrat. La figure 4.14 montre une microstructure de la fonte FT25 déposé avec les cinq passes.

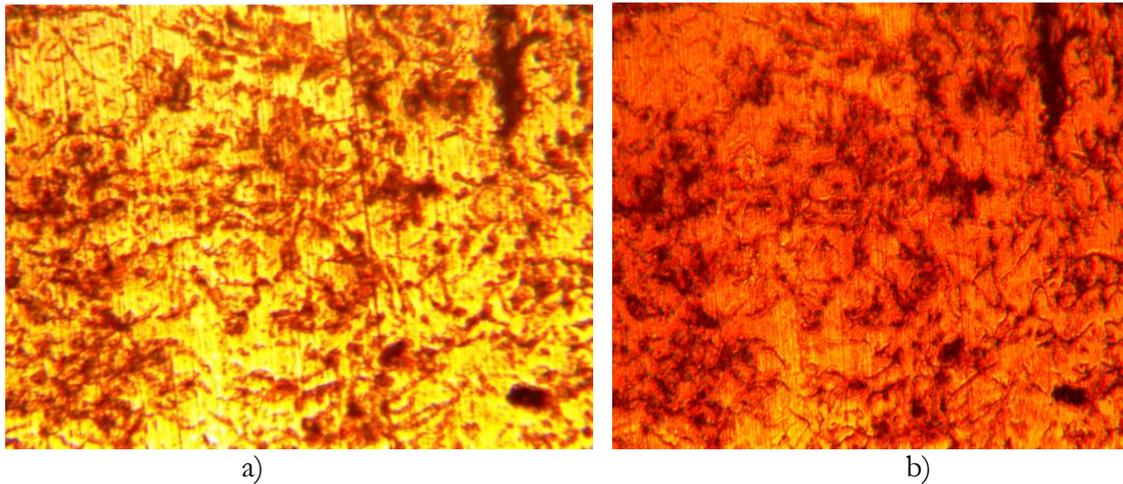


Figure 4-14 : Microstructure d'une fonte FT25 de RW12496.

a) 3 passes

b) 5 passes

La microstructure montre des graphites de type A et B dans le revêtement à trois passes. La morphologie du graphite devient de type B et D dans le revêtement à cinq passes. Selon la microdureté du substrat évalué à environ 378 HV₁₀ pour les deux cas de déposition, nous pouvons raisonnablement dire qu'il y a présence de lédeburite avec présence de perlite plus ou moins fine.

La microdureté du revêtement est élevée et c'est attendu car un dépôt très dur. Elle est équivalente à celle du revêtement de Tungtec avec cependant un effet thermique moins important. La dureté à l'interface de 572 HV₁₀ confirme ces résultats. C'est un résultat logique car la poudre 51000 est un alliage réfractaire qui est utilisé comme tampon pour augmenter l'adhérence du revêtement et atténué les différences des propriétés physiques entre le substrat et le revêtement.

Nous pouvons conclure, que bien que la déposition du revêtement demande l'emploi de deux torches différentes : Eutalloy et la Castodyn DS8000, son utilisation est très utile pour les épaisseurs de revêtements importantes.

CONCLUSION

Une étude a été entamée au laboratoire LTSM pour évaluer l'influence des traitements thermiques classiques et de traitements de surface sur les fontes grises.

L'étude a porté sur une fonte grise FT25 qui a été soumise à différents traitements thermiques.

Pour les traitements classiques, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- la trempe à l'eau nous paraît sévère et est peu appropriée notamment pour les pièces massives.

La présence de la martensite la rend très fragile. S'il faut absolument passer par ce traitement, il faut alors prévoir un recuit de détente.

- la trempe à l'huile est intéressante pour les fontes grises. Elle aussi, peut-être d'un recuit de détente mais la disparité des propriétés entre la surface et le cœur du substrat est moins prononcée.

- le recuit de normalisation apporte une finesse à la perlite. Il augmente les propriétés mécaniques sans pour autant induire des grandes disparités au niveau de la microstructure.

Pour le traitement thermique superficiel au chalumeau à flamme, Pour le traitement au chalumeau suivi d'une trempe à l'eau, il y a formation d'une fonte blanche hypoeutectique

Mais le traitement superficiel suivi d'une trempe à l'huile, il ya présence d'une structure perlitique dont la finesse est remarquable. Il y a aussi la présence de cellules eutectiques ainsi des zones éparses de lédeburite eutectique (austénite + cémentite). Du point pratique, la trempe superficielle à l'huile est meilleure.

Pour les traitements de surface réalisés avec la projection thermique, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La poudre Chrometec ne perturbe pas la microstructure de la fonte grise et permet de contribuer à la fonte FT25, une meilleure tenue à la résistance à la chaleur et à une très bonne résistance à la corrosion.

- le revêtement Tungtec a une influence plus marquée sur la microstructure de la fonFT25. Du à sa technique de dépôt.il y a présence de fonte blanche hypoeutectique.

- Pour la poudre RW12496 + 51000, le revêtement déposé à un aspect plus lisse et homogène La microdureté du revêtement est élevée. Elle est équivalente à celle du revêtement de Tungtec avec cependant un effet thermique moins important. Son utilisation est très utile pour les épaisseurs de revêtements importantes.

References

- [1] A. Liu, B. Previtali, Laser surface treatment of grey cast iron by high power diode laser, Physics Procedia 5 (2010) 439–448.
- [2] [2] https://www.tec-science.com/material-science/iron-carbon-phase-diagram/cast-iron/#Hypoeutectic_cast_iron.
- [3] S. Jayanti, <http://www.engineeringenotes.com/metallurgy/grey-iron/heat-treatment-of-grey-irons/cast-irons-metallurgy/26448>.
- [4] Cees van de Velde, "Eutectic Solidification of Gray Cast Iron. PartIII", <http://www.ceesvandevelde.eu/eutcelpart3.htm>.
- [5] Fiche technique de la poudre RW 12496, Castolin Eutectic.
- [6] M. Fadhel BEN ETTOUIL [Modélisation rapide du traitement de poudres en projection par plasma d'arc]. Université de limoges, thèse de doctorat 2008.
- [7] <http://tss.asminternational.org/pertal/site/TS>.
- [8] G. ENGLAND, <<Nature of thermal spray coatings>>, Journée Scientifique, ONERA, 2003.
- [9] Sophie. BARRADAS, <<étude, à l'aide du choc laser, des mécanismes d'adhérence aux interfaces cuivre/aluminium et cuivre/cuivre obtenues par projection thermique>>, thèse de Doctorat, Ecole Des Mines de Paris, 2004.
- [10] Simone PARENT-SIMONIN et Jean-Claude MARGERIE. Technique de l'ingénieur : traitement thermiques des fontes.
- [11] - Technique de l'ingénieur M 380 ; Jean-Claude MARGERIE ; Propriétés des fontes grises ordinaires.

[12] Jacques Fargues, matériaux métalliques, Définitions, notions de base et classification des fontes, (2008), p312.

[13] Technique de l'ingénieur M 770; Jacques CHÉRIÈRE ; Propriétés des fontes à graphite nodulaire

[15]Laplanche, Les fontes et leur traitement thermique (tome II) page 139, 142 à 144, 160, 169, 170 à 172.

[16] – www.site.com ; « effet de Si sur les fontes ».

[17] – Métallurgie de la fonderie. [18]- H. Le Breton: Manuel pratique de fondeur de fonte, Dunod, paris 1966.

[19]- M. Geier, Métallurgie de fonderie T2, édition Eyrolles, (1978).

[20] – Technique de l'ingénieur M 4610 ; Jacques JAULT ; Fontes à graphite sphéroïdal.

[21] – Technique de l'ingénieur M 1611 ; Christian GATELLIER ; Élaboration de la fonte et de l'acier.

[24]- Rhp : www. Fondeur de France-orge.

[25]- www.site.com ; « effet de Si sur les fontes » [26]- M.KAWAMOTO and K. CKABYASHT : Study of dry sliding wear of castiron as a function of suriacetemperature.Wear , 58 (1980).

[27]- V.A.KISLICK ; the nature of white layersformed on friction surfaces .(in : Friction and Wear in Macginey) ASME Trans. Vol. 15 (1962)

[28]- K. FURSUND ; Wear in cylider liners. Wear, (1957\58) 114-228.

[29]- T.S. EYRE ; Wear resistance of metals- (inTreatise on Materials Science and tecnology, vol .13 – WEAR) Ed . Douglas Scott, Ac. Press, N.Y. 1979.

[30] http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bouzeghaia_nora/files/cours_traitement_de_surface_master1_gm.pdf

[40]- <https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/corrosion-des-metaux-etbetons/corrosion-desmateriaux-metalliques/corrosion-de-la-fonte-g>

[45] A History of Cast Iron Doru M. Stefanescu, The Ohio State University and The University of Alabama

La Liste des Figures

- Figure 1-1 : différentes familles de technologies traitement de surface.
Figure 1-2 : Procédé de traitement thermique
Figure 1-3 : Trempe générale instantanée d'une surface de révolution
Figure 1-4 Trempe au défilé (« de proche en proche »)
Figure 1-5 : revêtement sur un substrat
Figure 1-6 : schéma du revêtement métallique
Figure 1-7 : Principe fondamental de la projection thermique
Figure 1-8 : Schéma du procédé de projection par flamme
Figure 1-9 : Principe de fonctionnement d'un pistolet flamme fil
Figure 1-10. La projection par le Pistolet Eutalloy (super Jet-S).
Figure 2-1 : Structure d'une fonte
Figure 2-2 : Structure d'une fonte ductile
Figure 2-3 : Structure d'une fonte à graphite lamellaire
Figure 2-4 : Influence du Si sur la vitesse de refroidissement [18].
Figure 2-5 : Influence de la vitesse de refroidissement (de l'épaisseur de la pièce coulée) et de la Somme C + Si sur la structure de la fonte. Fontes blanches (I), fontes grises (II) et domaine (F + G)
Figure 2-6 : Influence de C et Si sur la structure de la fonte Fontes blanches (I), fontes grises
Figure 2-7 : Influence de quelques éléments sur la dureté de la ferrite
Figure 3-1 : Scie mécanique
Figure 3-2 : grenailleuse
Figure 3-3 : Torche à refusion Eutalloy
Figure 3-4 : Four de traitement thermique
Figure 3-5 : Polisseuse
Figure 3-6 : polisseuse de finition.
Figure 3-7 : microscope optique
Figure 3-8 : Micro duromètre Inovatest et duromètre Buehler
Figure 4-1 : Microstructure de la fonte FT25 à la réception.
Figure 4-2 : Microstructure de la fonte grise FT25 selon la bibliographie [1]
Figure 4-3 : Microstructure d'une fonte FT25 après trempe à l'eau (100X)
Figure 4-4 : Microstructure d'une fonte FT25 après trempe à l'huile (100X).
Figure 4-5 : Microstructure de la fonte grise FT25 refroidie à l'air (100X).
Figure 4-6 : Microstructure de la fonte FT25 chauffé à 900 °C et refroidie au four (100X)
Figure 4-7 : Trempe à huile après chauffage au chalumeau d'une fonte FT25 (200X).
Figure 4-8 : Trempe à L'eau après chauffage au chalumeau d'une fonte FT25 (200X).
Figure 4-9 : Formation des cellules eutectiques initiées par des dendrites austénitiques [4]
Figure 4-10 : Aspects des surfaces des revêtements déposés par l'Eutalloy.
Figure 4-11 : Dépôt Chromotec refroidi à l'air sur fonte FT25.
Figure 4-12 : Dépôt Tungtec refroidi à l'air sur fonte FT25.
Figure 4-13 : Dépôt Rototec 12496 refroidi à l'air sur fonte FT25.
Figure 4-14 : Microstructure d'une fonte FT25 de RW12496.