

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

Faculté de technologie

Département de génie mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention Du Diplôme de Master en génie mécanique

Option : ingénieur des matériaux de surface

THEME :

**Traitement de surface d'un alliage
d'aluminium de fonderie**

Al Si Cu

Réalisé par :

- Ouidar Zakaria
- Mouaici Ayoub Moussa

Promoteur :

Nemri Yacine

Année universitaire 2024/2025

Dédicace

Dédicace 1

Je dédie ce travail à ma chère famille, source de motivation, de patience et de soutien inconditionnel.

À mes parents, pour leurs sacrifices et leur confiance. À mes frères et sœurs, pour leur présence à mes côtés tout au long de ce parcours. Et à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont encouragé à aller au bout de mes efforts.

— Zakaria ---

Dédicace 2

Je dédie ce mémoire à ma famille et en particulier à mes parents, pour leur amour, leur encouragement et leur soutien moral et matériel.

À mes amis et collègues qui m'ont toujours soutenu avec bienveillance. Et surtout, à mon binôme Zakaria, pour le travail d'équipe, la persévérance, et l'esprit de collaboration tout au long de ce projet.

—ayoub---

Remerciements

Nous remercions Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la patience, la santé et la volonté nécessaires tout au long de nos études.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents, qui nous ont transmis dès notre plus jeune âge les valeurs d'intégrité, de droiture et de justice. Leur soutien inconditionnel a été une source constante de motivation.

Nous tenons à remercier chaleureusement **Monsieur Yacine NEMRI**, notre encadrant, pour son accompagnement tout au long de ce projet de fin d'études. Sa disponibilité, ses conseils éclairés et son soutien constant ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury,..... pour avoir accepté d'évaluer notre mémoire. C'est pour nous un grand honneur de bénéficier de leur regard expert.

Nous n'oublions pas l'ensemble de nos enseignants du **Département de génie mécanique**, dont l'engagement et la compétence ont fortement contribué à notre formation, tant sur le plan scientifique que personnel.

Enfin, nous remercions nos amis et collègues pour leur soutien moral et intellectuel, pour les nombreux moments partagés, ainsi que pour l'excellente ambiance de travail durant la préparation de ce projet. Nous leur souhaitons à tous une pleine réussite pour la suite.

Résumé (Français)

Ce mémoire étudie l'anodisation sulfurique d'un alliage d'aluminium de type Al-Si-Cu. L'objectif est d'évaluer l'effet de la tension appliquée et du matériau de la cathode (Al, Inox 430, Pb) sur l'épaisseur de la couche d'oxyde. Les résultats montrent que plus la conductivité de la cathode est élevée, plus la couche formée est épaisse. L'augmentation de la tension améliore également la croissance anodique. Sans traitement préalable de désoxydation, aucune couche n'est formée, confirmant son importance.

المخلص (العربية)

باستخدام حمض الكبريتيك. الهدف هو تحليل تأثير الجهد الكهربائي (Al-Si-Cu) يدرس هذا البحث الأكسدة بالأنودة لسبائك الألمنيوم على سمك طبقة الأكسيد. أظهرت النتائج أن الكاثود ذو التوصيل الكهربائي الأعلى (رصاص، Inox 430، ألومنيوم) ونوع الكاثود يعطي طبقة أسمك، وأن زيادة الجهد تحسن من التكون. في غياب إزالة الأكسيد المسبق، لم تتكون أي طبقة، مما يؤكد أهميتها.

Abstract (English)

This work investigates sulfuric anodizing of an Al-Si-Cu aluminum alloy. The study focuses on the effect of applied voltage and cathode material (Al, 430 stainless steel, Pb) on the oxide layer thickness. Results show that higher cathode conductivity leads to thicker oxide, and increased voltage enhances growth. Without pre-anodizing desoxidation, no oxide forms, proving its necessity.

Table des matières

Introduction générale 1

Partie théorique

Chapitre 1 : aluminium et ses alliages

1.1	L'élément de l'aluminium :.....	2
1.1.1	Généralités :.....	2
1.1.2	Histoire :.....	2
1.1.3	Extraction de l'aluminium :.....	3
1.1.4.	Propriété de l'élément d'aluminium :.....	5
	. Propriété mécanique :	5
	. Propriété physique :	6
	. Propriétés chimiques :.....	6
	. Propriétés électriques :.....	7
1.2	Alliages d'aluminium de corroyage :	7
1.2.1	Classification des alliages d'aluminium de corroyage :.....	7
1.2.2.	Désignation :	11
1.3	Alliage d'aluminium de fonderie :	12
1.3.1	Les alliages d'aluminium de fonderie :	12
1.3.2	Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie :	13
1.3.3	Facteurs influençant les propriétés des pièces coulées en aluminium.....	13
1.3.4	Effets des éléments d'addition dans les alliages d'aluminium de fonderie :	14
1.3.5	Procédés de moulage de l'aluminium	15
1.3.6	Caractéristique de la microstructure des alliages d'aluminium de fonderie :	19
	. Effets de modification :	21
1.4.	Domaines d'application de l'aluminium et de ses alliages :	23

Chapitre 2 : Traitement de surface des alliages d'aluminium

2.1	Traitement de surface : traitement thermochimique.....	26
	Application sur les alliages de fonderie.....	27
2.2	Traitement de surface : Conversion chimique (Chromatation).....	27
	Définition.....	27
2.2.1	Principe du procédé.....	27
2.2.2	Types de chromatation :	28

Application sur les alliages de fonderie.....	29
2.3 Traitement de surface : Peinture poudre.....	29
Définition.....	29
2.3.1 Principe du procédé.....	29
Application sur les alliages de fonderie.....	31
2.4 Traitement de surface : Électrodéposition (Electroplating)	31
Définition.....	31
2.4.1 Principe du procédé :.....	31
2.4.2 Métaux couramment utilisés	32
2.5 Traitement de surface : Dépôts physiques et chimique en phase vapeur (PVD, CVD) sur l'aluminium :	33
2.5.1 Explication des procédés	33
Applications	33
2.6 Traitement de surface : Passivation de l'aluminium	34
Définition.....	34
2.6.1 Principe du procédé.....	34
2.6.2 Effets sur la surface	35
Application sur les alliages de fonderie.....	35
2.7 Traitement de surface : anodisation	36
2.7.1 Définition de l'anodisation.....	36
2.7.2 Préparation de surface	36
Dégraissage.....	37
Décapage.....	37
. La couche barrière (ou couche compacte) :.....	38
. La couche poreuse :	38
2.7.3 Conditions d'anodisation :	41
2.7.4 Principaux procédés d'anodisation :.....	42
Paramètres de l'anodisation :.....	42
. La densité de courant :	42
Tension :.....	42
. Concentration d'acide sulfurique :.....	42
. Température :	43
. Le temps d'anodisation :	43

Chapitre 3 : Etude expérimentale

Partie 1 : élaboration de la pièce.....	49
1.1 Etape 1 :.....	49
1.2 Etape 2 :.....	49
1.3 Etape 3 :.....	50
Vérification des résultats des nuances dans laboratoire	50
1.4 Etape 4 :.....	51
1.5 Etape 5 :.....	52
2 Partie 2 : le traitement de surface (anodisation sulfurique)	53
2.1 Dispositifs expérimentaux des dépôts :.....	54
2.1.1 Produits chimiques :.....	54
Matériaux :.....	54
2.1.2 Les outils utilisés :.....	55
2.2 Installation de processus.....	56
2.3 Préparation de surface :.....	57
2.3.1 Dégraissage	57
2.3.2 Décapage :.....	58
2.4 Anodisation :.....	59
2.4.1 Préparation de l'électrolyte d'anodisation.....	59
2.4.2 Paramètre d'anodisation :.....	60
2.5 Préparation métallographique :	60
2.5.1 Enrobage :	60
2.5.2 Polissage :.....	61
2.6 Microscopie :.....	61

Chapitre 4 : Résultat et discussion

4.1 Microstructure :.....	62
4.2 Après l'anodisation :	63
4.3 Conductivité électrique :	65
Conclusion générale	67

Liste des Figures

Chapitre 1 : aluminium et ses alliages

Figure 1.1:principe d'élaboration d'aluminium	3
Figure 1.2:bauxite.....	4
Figure1. 3:l'alumine.....	4
Figure 1.4:aluminium	5
Figure 5:désignation d'alliage d'aluminium de corroyage.....	11
Figure 1.6:schéma de procédé de moulage	16
Figure 1.7:désignation des alliages d'aluminium de fonderie.....	17
Figure 1.8 : microstructure d'un alliage d'aluminium de fonderie	20
Figure 1.9:microstructure de la phase intermétallique	21
Figure1. 10 :Degrés variables de modification de l'eutectique aluminium-silicium 19	22
Figure 1.11:Aéronautique et aérospatial	23
Figure 1.12:Automobile	23
Figure 1.13:Bâtiment et construction	23
Figure 1.14:Emballage	24
Figure 1.15:Électricité et électronique	24

Chapitre 2 : Traitement de surface des alliages d'aluminium

Figure 1.15:Industrie navale et ferroviaire	24
Figure 2.1:principe de chromatisation.....	28
Figure 2.2:principe peinture poudre	30
Figure 2.3: principe d'électrodéposition.....	32
Figure 2.4:passivation de l'aluminium	34
Figure 2.5:principe de l'anodisation.....	37
Figure 2.6:Réponse en tension pour une anodisation de type barrière sous densité de courant constante, b) Représentation schématique de la croissance d'une couche anodique de type barrière.....	39
Figure 2.7:Réponse en tension ou en densité de courant pour une anodisation de type.....	40
Figure 2.8:Représentation schématique de la croissance d'une couche anodique de type poreux.....	40
Figure 2.9:schéma d'une structure de couche d'oxyde	41

Chapitre 3 : étude expérimentale

Figure 2.10:Concentration d'acide sulfurique :.....	43
Figure 3.2: étape de casser	49
Figure 3.1:pierre de silicium	49
Figure 3.3 : four ON.....	50
Figure 3.4:four entrain de fusionné	50
Figure 3.5:résultat de la composition chimique	51
Figure 3.6: spectromètre.....	51
Figure 3.7:moule prêt	51

Figure 3.8: bentonite	51
Figure 3.9:sable + bentonite	51
Figure 3.10 :le coulage	52
Figure 3.11:principe de coulage	52
Figure 3.12:pièce brute après la coulée	52
Figure 3..13:Schéma d'une pièce après la coulée	52
Figure 3.14 :pièce après les éliminations	53
Figure 3.15 :après de couper	54
Figure 3.16 :bain de inox.....	55
Figure 3.17 :bain en plastique	55
Figure 3.18 :générateur	55
Figure 3.19 :aluminium pur.....	56
Figure 3.20 :plomb	56
Figure 3.21 :principe de l'anodisation.....	57
Figure 3.22 :procédé de dégraissage	57
Figure 3.23 :procédé de dégraissage	58
Figure 3.24 :préparation d'acide	58
Figure 3.26 :opération d'enrobage	61

Chapitre 4 : résultat et discussion

Figure 4.1 :microscope optique	61
Figure 4.2:représente le diagramme d'équilibre Al Si	63
Figure 4.3:Cathode Pb, Tension 24V	63
Figure 4.4:Cathode Inox, Tension 12 V	64
Figure 4.5 :Cathode Pd, Tension 12 V	64
Figure 4.6 :Cathode Al, Tension 12 V	65

Liste des tableaux

Tableau 1:propriétés mécaniques de l'aluminium.....	5
Tableau 2:désignation des alliages d'aluminium de fonderie	19
Tableau 3:les condition	41
Tableau 4:résultat des nuances d'un alliage d'aluminium	50
Tableau 5:liste des produits chimique utilisées.....	54
Tableau 6:paramètre d'anodisation	60
Tableau 7:différente échantillon.....	60

Introduction générale

L'aluminium et ses alliages occupent une place prépondérante dans les industries modernes en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques, leur faible densité, leur bonne conductivité thermique et électrique, ainsi que leur remarquable résistance à la corrosion. Toutefois, dans certaines conditions agressives, cette résistance naturelle peut s'avérer insuffisante, nécessitant l'application de traitements de surface spécifiques pour renforcer la durabilité et les performances des composants.

Parmi ces traitements, **l'anodisation** constitue l'une des méthodes les plus répandues et efficaces pour améliorer la résistance à la corrosion, l'adhérence des revêtements, et les propriétés esthétiques de la surface de l'aluminium. Le procédé repose sur la conversion électrochimique de la surface de l'aluminium en une couche d'oxyde d'alumine, dure et poreuse, pouvant être contrôlée selon les conditions opératoires.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude de **l'anodisation sulfurique** appliquée à un alliage d'aluminium de fonderie de type Al-Si-Cu. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de certains paramètres opératoires, notamment la **tension d'anodisation** et la **nature du matériau de la cathode**, sur la formation, l'épaisseur et la qualité de la couche d'oxyde formée.

À travers une approche expérimentale rigoureuse, des essais d'anodisation ont été réalisés sur plusieurs échantillons en faisant varier les conditions électriques et les matériaux électrodes. L'étude s'intéresse également à l'effet de la **préparation de surface**, notamment le rôle de la désoxydation, dans le bon déroulement du processus anodique.

Ce mémoire présente dans un premier temps un état de l'art sur les alliages d'aluminium, les traitements de surface, et le principe de l'anodisation. Il expose ensuite la méthodologie expérimentale adoptée, avant de discuter les résultats obtenus et de proposer des pistes d'optimisation pour le procédé.

PREMIERE PARTIE

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1 :

L'aluminium et ses alliages

Chapitre 1 : aluminium et ses alliages

Introduction

Dans ce chapitre, on s'intéressera de façon générale à l'aluminium et ses alliages, L'aluminium est un matériau polyvalent utilisé dans de nombreuses industries et grande variété d'applications que cette forme d'emballage, de conserves, ou bien des matériaux de construction (poutres, revêtements, fenêtres, etc...). Ainsi on va présenter les principales caractéristiques de l'aluminium et ses alliages.

1.1 L'élément de l'aluminium :

1.1.1 Généralités :

L'aluminium est le métal le plus abondant sur la planète, puisqu'il est le troisième élément le plus présent dans la croûte terrestre (après l'oxygène (47 %) et le silicium (28 %), en masse solide d'environ 8 %). Sa fabrication se fait en trois étapes majeures.

Tout d'abord il faut extraire l'alumine de son minerai, la bauxite, dont le rendement avoisine 25 %. La bauxite, découverte en 1821 par Pierre Berthier, est un minerai richissime en alumine (40-60 %), qui est en général associé à de la silice et des oxydes de fer. Le traitement de la bauxite consiste à la dissoudre, à chaud, sous haute pression, dans une solution de soude caustique. L'hydrate obtenu sera ensuite cristallisé puis calciné pour donner de l'alumine sous forme de poudre blanche.

En second lieu, l'alumine brute est électrolysée avec de la cryolite (AlF_3 , 3NaF) pour donner du métal aluminium. [1].

1.1.2 Histoire :

Le métal industriel plus récemment découvert est l'aluminium, dont l'usage est daté de la fin du XIXe siècle. En 1825 Hans Christian Oersted obtient sous forme de poudre grise l'aluminium en tant que corps simple, mais très chargé d'impuretés. En 1827 Friedrich Wöhler obtient également cette poudre grise d'aluminium, en revanche moins chargée en impuretés. Ce n'est qu'en 1854 qu'Henri Sainte-Claire Deville présente le premier lingot d'aluminium obtenu à l'état fondu par un procédé mis réellement au point en 1859. L'aluminium connaît au cours d'un peu plus d'un siècle un bond exceptionnel provoquant son entrée comme premier métal

non ferreux et deuxième métal, après le fer. 13 tonnes d'aluminium ont été consommées dans le monde en 1886, 30 millions de tonnes en 2005. Il est le métal le plus abondant dans la terre avec une proportion dans la croûte terrestre comprise entre 8 et 10 % tandis que le fer ne représente que 5 %, le magnésium 2,1 %, le titane 0,4 % et le cuivre 0,01 %.

Le premier de tous les alliages d'aluminium fut réalisé par Alfred Wilm, chimiste allemand, en 1908. Cet alliage d'aluminium, contenant du cuivre et du magnésium, qu'exploita dès lors les usines de Düren sera dénommé aluminium de Düren, c'est le « Duralumin », un alliage à « durcissement structural » par traitement thermique, dont la découverte revient à Conrad Claessen en 1905. Il s'agit aujourd'hui du 2017 A, anciennement le dénommé A-U4G en France. Le second d'aluminium sera mis au jour, en 1920 par le hongrois Aladar Pacz, émigré aux Etats-Unis, cet alliage d'aluminium avec 13 % de silicium affiné au sodium sera désigné sous le terme « Alpax », alliage consacré au moulage, anciennement le A-S13 en France. [2]

1.1.3 Extraction de l'aluminium :

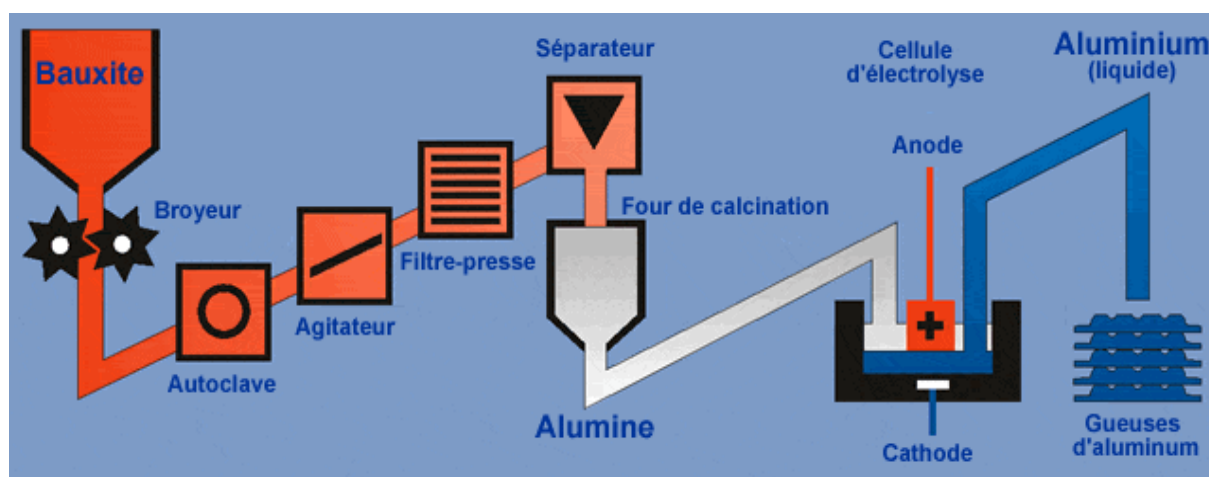


Figure 1.1 : principe d'élaboration d'aluminium

La Bauxite : Tout d'abord, l'aluminium est un métal très courant sur Terre, en troisième position après l'oxygène et le silicium. Les bauxites, roches à haute teneur en aluminium (45 à 60%), sont à l'heure actuelle la seule source d'extraction pour l'aluminium.



Figure 1.2: bauxite

L'alumine : L'alumine est prélevée à partir de bauxite par le procédé Bayer qui commence par un broyage de la bauxite traitée à chaud par de la soude pour donner une liqueur dans laquelle les oxydes de fer et de silicium sont séparés puis envoyés à des décomposeurs qui permettent la précipitation de l'alumine.



Figure 1.3: l'alumine

. L'aluminium

L'aluminium est présent à l'état brut, par électrolyse de l'alumine, dans une cuve ayant son graissage en carbone en tant que cathode. L'aluminium se dépose sur le fond de cette cuve. Notons que l'aluminium est noté Al et que son numéro atomique est 13.

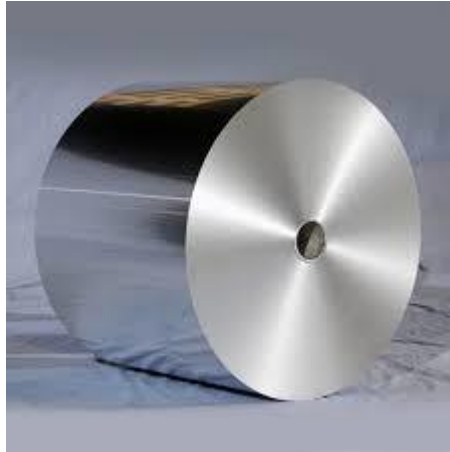


Figure 1.4: aluminium

1.1.4. Propriété de l'élément d'aluminium :

. Propriété mécanique :

Les caractéristiques mécaniques de l'aluminium sont fonction de son degré de pureté et de son mode d'emploi (utilisation sous forme coulée, laminée puis éventuellement recuite).

Propriétés	Coulé	Laminé recuit
Résistance à la traction N/mm²	70 à 100	70 à 90
Limite d'élast N/mm²	30 à 40	30 à 40
Allongement %	15 à 25	40 à 30
Dureté Brinell	15 à 25	15 à 25
Module d'élasticité	67500	67500
Module de torsion	25 à 26	25 à 26

Tableau 1: propriétés mécaniques de l'aluminium

. Propriété physique :

L'aluminium est l'élément chimique du groupe III du tableau périodique de Mendeleïev, c'est un élément chimique de la famille des métaux, qui est ainsi, défini par son numéro atomique : $Z = 13$, sa masse atomique : 26,97 u, son point de fusion à 660 °C, sa température d'ébullition de l'ordre de 1800 °C, le rendant à chaque instant accessible à la grande variété d'applications industrielles pour lesquelles il sera utilisé dans tous les secteurs de l'activité humaine. Cristallographiquement, il est cubique à faces centrées (CFC) et son paramètre de maille vaut : $a = 4,0412 \text{ \AA}$, ce qui lui apporte de très bonnes propriétés mécaniques et un excellent formage. Sa faible densité est l'une de ses caractéristiques physiques essentielles, en ayant encore, à température ambiante, une valeur de 2,7 g/cm³ qui le place parmi les plus intéressants des éléments dans un très grand nombre d'applications requérant légèreté et résistance, parmi lesquelles on peut citer notamment l'aéronautique et l'automobile, où ses alliages légers de densité, qui reste pour eux toujours généralement inférieure à 3 g/cm³, permettent en même temps de maintenir les avantages de légèreté tout en améliorant certaines autres de leurs caractéristiques [4].

. Propriétés chimiques :

A) Résistance à la corrosion :

Très bonne en atmosphère neutre ou légèrement oxydante.

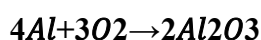
Mauvaise en présence de chlorures (ex. eau de mer) → corrosion par piqûres . [5]

B) Réactivité :

L'aluminium est un métal jaugé comme très réactif. Cependant, mis à l'air ou mis dans l'eau, il semble peu réactif. En réalité, l'aluminium est protégé, en raison d'un produit de corrosion, l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃) qui se forme spontanément en surface. Cette couche est dense, adhérente, imperméable et empêche la corrosion dans le temps. [6]

Réaction d'oxydation spontanée à l'air :

Réaction d'oxydation spontanée à l'air :



. Propriétés électriques :

L'aluminium est un très bon conducteur d'électricité, et c'est en raison de ces propriétés remarquables que l'on l'utilise en particulier pour fabriquer des réseaux électriques, des câbles.

Résistivité électrique (ρ) :

$2,8 \times 10^{-8} \Omega.m$, ce qui signifie qu'il présente une faible résistance au passage du courant électrique.

Conductivité électrique : $\sim 37,7 \times 10^6 \text{ S/m}$ (61 % IACS)

Au 2e rang après le Cuivre.[7]

1.2 Alliages d'aluminium de corroyage :

Les alliages d'aluminium corroyée sont appréhendés ou transformés par les méthodes de transformation mécanique du type laminage, extrusion, tréfilage ou forgeage tout comme aux alliages de fonderie qui sont moulés au contraire, les alliages de corroyage étant destinés à être très ductiles ou à avoir des propriétés mécaniques satisfaisantes tout en ayant une soudabilité relativement acceptable dans des conditions industrielles. Ils sont classés en séries normalisées (1000 à 8000) selon leur composition chimique ainsi que leurs propriétés mécaniques.

1.2.1 Classification des alliages d'aluminium de corroyage :

. Série 1xxx : aluminium pur

Composition : environ 99 % Al ou plus

Utilisation : Conducteur

Constituants des conducteurs électriques (fils et câbles)

Éléments de construction utilisés dans des échangeurs thermiques (radiateurs, climatiseurs..)

Éléments utilisés comme réflecteurs et équipement de signalisation...

Exemples de matériaux de la série : 1050, 1100, 1350.

. Série 2xxx : Alliages aluminium-cuivre

Composition : Contient entre 2 et 6 % de cuivre, parfois avec du magnésium.

Propriétés :

Excellente résistance mécanique et dureté (proche des aciers doux).

Sensible à la corrosion intergranulaire (souvent protégé par anodisation).

Difficile à souder.

Applications :

Aéronautique (fuselages, ailes d'avion)

Matériel militaire

Pièces mécaniques de haute performance

Exemples : 2024, 2219, 2618 []

. Série 3xxx : Alliages aluminium-manganèse

Composition : Contient entre 0,5 et 1,5 % de manganèse.

Propriétés :

Belle résistance à la corrosion (meilleure que les alliages 2000).

Belle aptitude au façonnage à froid.

Résistance mécanique modérée.

Applications :

Revêtements de toiture

Industrie alimentaire (cannettes, récipients, emballages)

Réservoirs et citernes

Exemples : 3003, 3105 []

. Série 4xxx : Alliages aluminium-silicium

Composition : Contient entre 4 et 12 % de silicium.

Propriétés :

Excellente coulabilité, beaucoup utilisé en fonderie.

Bonne résistance à l'usure et aux hautes températures.

Faible coefficient de dilatation thermique.

Applications :

Pistons, cylindre et pièces de moteur automobile

Système de freinage

Matériel de soudage

Exemples : 4032, 4045[]

. Série 5xxx : Alliages aluminium-magnésium

Composition : Contient entre 2 et 6 % de magnésium.

Propriétés :

Excellente résistance à la corrosion (idéale en milieu marins).

Belle aptitude au soudage.

Résistance mécanique modérée à élever.

Applications :

Construction navale (coque de bateaux)

Réservoirs sous pression

Industrie ferroviaire

Exemples : 5052, 5083, 5754 []

. Série 6xxx : Alliages aluminium-magnésium-silicium

Composition : Contiennent du magnésium (0,4 à 1,2 %) et du silicium (0,7 à 1,3 %).

Propriétés :

Très bon compromis entre résistance mécanique, soudabilité et corrosion.

Excellente aptitude au traitement thermique (durcissement par précipitation).

Applications :

Bâtiment (structures, fenêtres, façades)

Automobile (châssis, jantes, pièces moteur)

Équipement sportif (cadres de vélos)

Exemples : 6061, 6082, 6101[]

. Série 7xxx : Alliages aluminium-zinc

Composition : Contiennent 4 à 8 % de zinc, parfois du magnésium et du cuivre.

Propriétés :

Très haute résistance mécanique (supérieure aux autres séries).

Sensibles à la corrosion sous contrainte (nécessitent traitements de surface).

Peu soudables.

Applications :

Aéronautique et spatial (structures d'avions)

Matériel sportif (clubs de golf, cadres de vélos)

Armement (canons, véhicules blindés)

Exemples : 7075, 7050, 7475[]

. Série 8xxx : Alliages spéciaux

Composition : Contiennent divers éléments (fer, lithium, nickel, etc.).

Propriétés :

Adaptées à des applications très spécifiques.

Bonne résistance chimique et mécanique.

Applications :

Feuilles d'aluminium (emballages alimentaires)

Câbles électriques haute performance

Exemples : 8011, 8090 (alliages aluminium-lithium pour l'aérospatial). [4]

1.2.2. Désignation :

Les Alliages d' Aluminium Corroyés

Désignation symbolique, exemple :

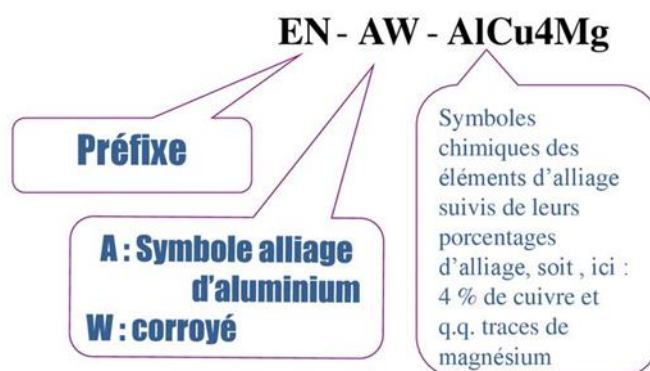


Figure1.5: désignation d'alliage d'aluminium de corroyage

1.3 Alliage d'aluminium de fonderie :

Introduction

La fonderie désigne l'ensemble des procédés permettant d'obtenir un objet métallique en faisant fondre un métal, puis en le coulant dans une empreinte appelée moule. Ce moule peut être en sable, en céramique ou métallique, en fonction du procédé utilisé et des caractéristiques finales recherchées. [8].

Cette technique est employée pour divers types de métaux, notamment :

L'acier,

La fonte (grise, malléable, sphéroïdale...),

Les alliages de cuivre,

Les alliages d'aluminium, qui seront abordés en détail dans la section suivante.

1.3.1 Les alliages d'aluminium de fonderie :

Les alliages d'aluminium de fonderie sont obtenus par moulage (moulage en sable ou moulage métallique) et sont largement utilisés dans des industries variées allant de l'automobile à l'aéronautique en passant par l'électronique et l'emballage. [4] [9]

Les éléments d'addition présents dans ces alliages peuvent être sous différentes formes :

- **En solution solide,**
- **Sous forme de dispersoïdes,**
- **Sous forme de précipités à l'intérieur du grain,**
- **Sous forme de composés intermétalliques localisés aux joints de grains.**

En raison de la diversité des éléments d'alliage, plusieurs phases métallurgiques apparaissent lors de la solidification et du refroidissement ultérieur.

Les alliages corroyés se distinguent des alliages moulés par leur aptitude à être mis en forme par déformation mécanique (laminage, extrusion, forgeage).

Les alliages d'aluminium de fonderie et les alliages corroyés sont classés en :

1. Alliages traitables thermiquement

(Amélioration des propriétés mécaniques par traitements thermiques).

2. Alliages non-traitables thermiquement

(Renforcés par écrouissage). []

1.3.2 Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie :

Les alliages d'aluminium de fonderie présentent des propriétés essentielles pour la production de pièces moulées :

- **Point de fusion relativement bas** ($\approx 660^{\circ}\text{C}$), facilitant leur mise en œuvre.
- **Haute fluidité**, garantissant un remplissage efficace des moules.
- **Bonne stabilité chimique** et résistance à l'oxydation.
- **Rapidité de transfert thermique**, influençant les vitesses de solidification.
- **Finition de surface améliorée**, avec peu de défauts.
- **Bonne résistance au craquage à chaud**, selon la composition de l'alliage. [10] [11]

1.3.3 Facteurs influençant les propriétés des pièces coulées en aluminium

Les propriétés mécaniques et physiques des pièces en aluminium moulé dépendent de plusieurs paramètres :

1. Composition chimique de l'alliage :

Détermine le potentiel de coulabilité et les performances mécaniques finales.

Influence la formation des microstructures et la morphologie des phases précipitées.

2. Vitesse de refroidissement :

Influence la taille des grains et la distribution des phases précipitées.

Conditionne la résistance mécanique et la ductilité.

3. Processus de moulage :

Chaque procédé (moulage en sable, sous pression, à la cire perdue...) impose des conditions thermiques spécifiques qui influencent la microstructure et les propriétés finales. [12]

4.Solidification et défauts internes :

La porosité, la fissuration et la formation d'inclusions affectent la résistance mécanique, la fatigue et la ductilité.

Un contrôle strict des conditions de coulée est nécessaire pour minimiser ces défauts. [12][13]

1.3.4 Effets des éléments d'addition dans les alliages d'aluminium de fonderie :

- **Silicium (Si)**

Améliore la fluidité et la résistance à chaud.

Réduit le coefficient d'expansion thermique.

Présent dans les alliages Al-Si, connus pour leur excellente coulabilité.

- **Cuivre (Cu)**

Augmente la résistance mécanique et la dureté.

Améliore les propriétés mécaniques des alliages traitables thermiquement.

- **Magnésium (Mg)**

Renforce l'alliage par durcissement structural.

Augmente la dureté après vieillissement structural.

Sa concentration influence la résistance mécanique et la ductilité.

- **Fer (Fe)**

Forme des composés intermétalliques (Al_3Fe), pouvant réduire l'allongement à la rupture.

Peut-être combiné avec d'autres éléments (Si, Cu, Ni, Mn).

- **Nickel (Ni)**

Augmente la dureté et la résistance à haute température.

Apporte un effet positif lorsqu'il est combiné avec du zinc.

- **Zinc (Zn)**

Améliore l'usinabilité des alliages Al-Si.

En association avec le nickel, il optimise la résistance thermique.

- **Manganèse (Mn)**

Réduit l'impact négatif du fer sur la ductilité.

Améliore les propriétés mécaniques, notamment la résistance aux chocs.

- **Titane (Ti)**

Favorise l'affinage du grain lorsqu'il est allié au bore.

Améliore la résistance et la stabilité structurelle. [14][15]

1.3.5 Procédés de moulage de l'aluminium

a. Moules consommables vs non consommables

Moules consommables

→ Le moule est ruiné à chaque coulée

Exemples : moulage sable (le moyen le plus employé), moulage cire perdue, moulage plâtre

Moules non consommables

→ Moules à réutiliser plusieurs fois

Réalisés en fonte, acier, etc.

Usures progressives par fatigue thermique, fissuration et détérioration

b. Remplissage : pression vs gravité

Moulage gravité

Le métal liquide s'écoule dans la cavité par le poids de son propre

Moulage sous pression

Le métal est injecté dans la cavité sous pression.

→ Il permet de ne pas utiliser des moules consommateurs (moules en acier très robustes).

Variantes sous faible pression (contre-gravité)

Procédés à pressions faibles (ex. basse pression, pompage), appliqués moules consommateurs ou permanents.

c. Système d'alimentation et masselotte :

Système d'alimentation :

Bassin de coulée → Descendeur → Canaux périphériques → Entrées dans la pièce.

Masselottes (risers) : Volumes de métal liquide chaud placés au dehors de la cavité, compensent le retrait lors pour éviter défauts internes.

En moulage sous pression, les masselottes sont peu utilisées, cela en raison de le refroidissement rapide du métal qui les rend peu efficaces.

On compense par :

Conception spécifique du moule.

ou.

Refroidissement contrôlé.

Pression élevée pour assurer la qualité interne.

d. Moulage sable :

Moule matériel ayant reçu imprimée dans du sable.

Le sable est soit humecté, soit sec, il est précisé, que le sable comportera des grains plus ou moins gros, trier pour principe de granulométrie adapté.

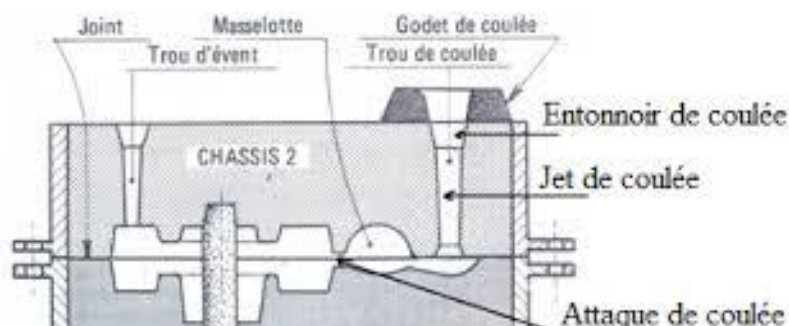


Figure 1.6: schéma de procédé de moulage

1.3.6 Désignation des alliages d'aluminium de fonderie :

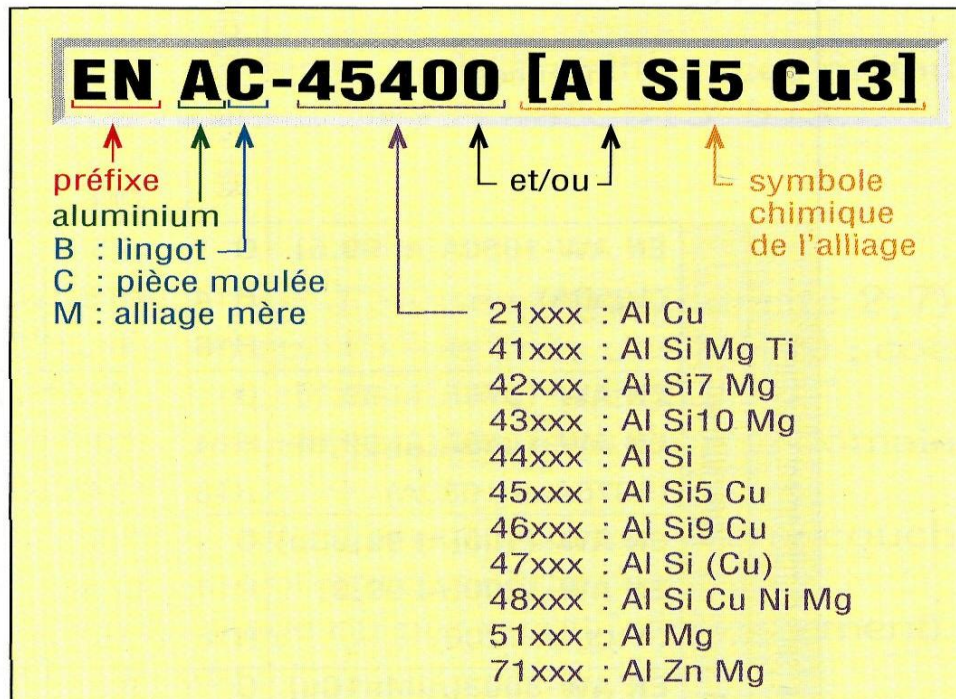


Figure 1.7: désignation des alliages d'aluminium de fonderie

En Europe, la norme **EN 1780-1** définit un système de désignation numérique à cinq chiffres pour ces alliages :

Premier chiffre : indique l'élément d'addition principal de l'alliage.

2xxxx : cuivre (Cu)

4xxxx : silicium (Si)

5xxxx : magnésium (Mg)

7xxxx : zinc (Zn)

Deuxième chiffre : désigne le groupe de l'alliage, chaque groupe présentant des caractéristiques mécaniques ou physiques similaires.

Trois derniers chiffres : numéro d'ordre identifiant la variante spécifique de l'alliage.

Par exemple, l'alliage EN AC-43100 appartient à la série 4000 (alliages à base de silicium) et au groupe AlSi10Mg, contenant environ 10 % de silicium et des ajouts de magnésium.

Il existe également une désignation basée sur les symboles chimiques, conforme à la norme **EN 1780-2**, qui utilise les symboles des éléments suivis de leurs pourcentages massiques approximatifs.

Par exemple, l'alliage **AlSi7Mg 0,6** contient environ 7 % de silicium et 0,6 % de magnésium.

Exemple d'alliage	Désignation EN	Désignation NF (ancienne norme)	Composition principale
Aluminium- Silicium 7% Magnésium 0,6%	EN AC-45000	A-S7G06	Al-Si7Mg0,6
Aluminium- Silicium 10% Magnésium 0,6%	EN AC-45100	A-S10G0,6	Al-Si10Mg0,6
Aluminium- Silicium 9% Cuivre 3%	EN AC-44300	A-S9U3	Al-Si9Cu3
Aluminium- Silicium 5% Cuivre 1%	EN AC-44200	A-S5U	Al-Si5Cu
Aluminium- Silicium 12% Cuivre 1%	EN AC-44400	A-S12U	Al-Si12Cu

Aluminium- Cuivre 5% Magnésium 0,5%	EN AC-46000	A-U5GT	Al-Cu5MgTi
Aluminium-Zinc 10%	EN AC-47000	A-Zn10	Al-Zn10

Tableau 2:désignation des alliages d'aluminium de fonderie

En France, une ancienne désignation métallurgique, définie par la norme NF A 02-004 (aujourd'hui annulée), est encore couramment utilisée. Cette désignation utilise des lettres pour représenter les éléments d'alliage :

A : aluminium

S : silicium

G : magnésium

U : cuivre

Z : zinc

Par exemple, l'alliage A-S7G06 contient environ 7 % de silicium et 0,6 % de magnésium.

Pour plus de détails sur les normes et les désignations, tu peux consulter la norme EN 1706, qui spécifie la composition chimique et les caractéristiques mécaniques des pièces moulées en aluminium et alliages d'aluminium.

1.3.6 Caractéristique de la microstructure des alliages d'aluminium de fonderie :

Les caractéristiques microstructurales sont le résultat de la composition chimique et des conditions de solidification du métal. Elles se différencient des défauts, mais parmi elles, certaines ont plus d'influence sur les propriétés mécaniques que d'autres :

- **taille, forme et distribution des phases intermétalliques**
- **distance inter-dendritiques**

- taille et morphologie des grains
- modification de l'eutectique et raffinement de la phase primaire

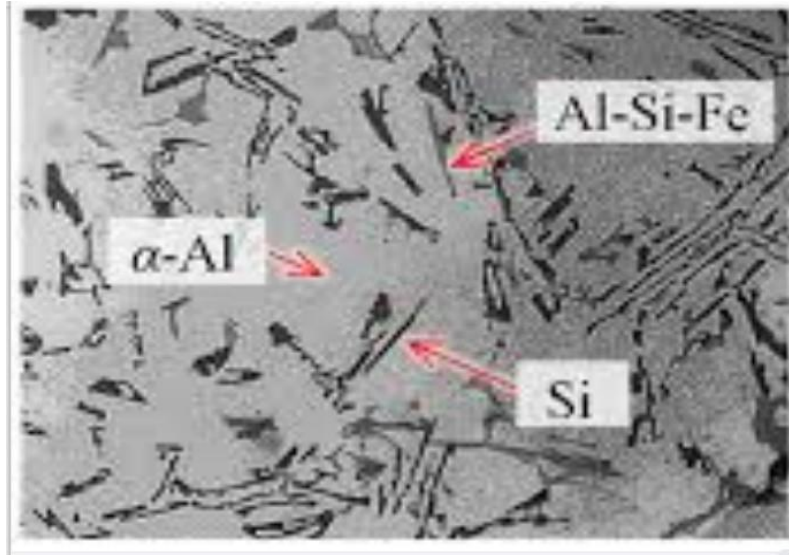


Figure 1.8 : microstructure d'un alliage d'aluminium de fonderie

1. Phase principale : la solution solide α -Al

La phase majoritaire dans presque tous les alliages de fonderie de type aluminium est bien la solution solide α -Al : une solution substitutionnelle d'Al pur comportant des éléments d'alliage dissous (Si, Mg, Cu, Zn,...). Cette phase se présente généralement sous forme dendritique dont la taille dépend de la vitesse de refroidissement (une structure dendritique fine étant assez souvent souhaitée pour ses effets bénéfiques sur les propriétés mécaniques et la tenue à la fatigue). [16]

2. Phases intermétalliques

En plus de la phase α , divers composés intermétalliques se forment selon les éléments d'alliage présents. Ces phases, souvent dures et fragiles, précipitent en général à l'état solide, aux joints de grains ou dans les zones inter dendritiques. Elles sont notamment riches en fer (Fe), manganèse (Mn), cuivre (Cu)..., et leur nature dépend des interactions métallurgiques entre les éléments.

Parmi les phases intermétalliques couramment rencontrées :

Al_5FeSi , $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}_2$: phases riches en fer, responsables de la fragilité des alliages si elles prennent une morphologie aiguë (« Chinese script » ou en aiguilles).

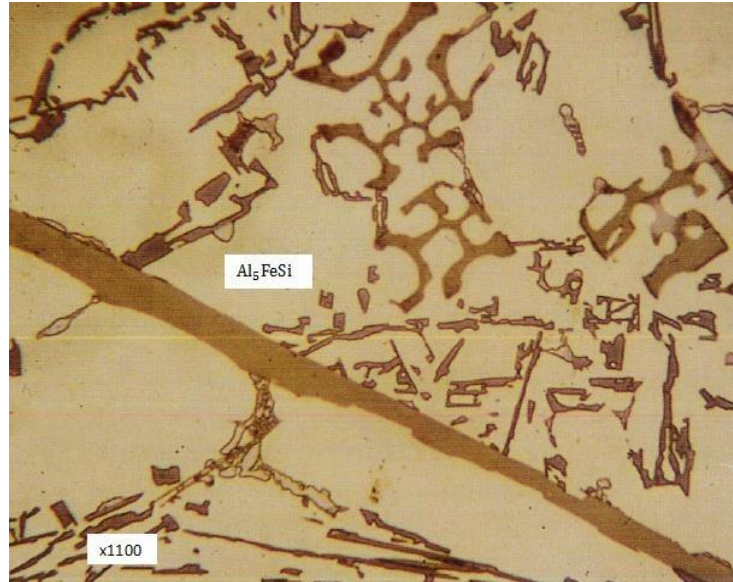


Figure 1.9: microstructure de la phase intermétallique d'un alliage d'aluminium de fonderie Al Si Cu

Al_2Cu (phase θ) : formée dans les alliages Al-Cu, durcissant mais sensible à la corrosion.[18]

Phases secondaires spécifiques : silicium et magnésium

1. Silicium (Si)

Dans les alliages Al-Si (principalement hypoeutectiques), le silicium se précipite en phase secondaire libre sous forme de cristaux lamellaires dans l'eutectique Al-Si. Cette morphologie est naturellement fragile. Cependant, l'ajout de modificateurs (Na, Sr, Sb) permet de transformer cette morphologie en une forme fibreuse beaucoup plus tenace, ce qui améliore significativement la ductilité et la résistance aux chocs.

. Effets de modification :

L'addition d'éléments modificateurs, notamment le sodium (Na) et le strontium (Sr), est couramment utilisée pour affiner la structure eutectique des alliages aluminium-silicium hypoeutectiques. Cette opération vise à transformer la morphologie du silicium eutectique,

initialement grossière et lamellaire, en une structure plus fine et fibreuse, améliorant ainsi les propriétés mécaniques, notamment la ductilité et la ténacité. [19] [20]

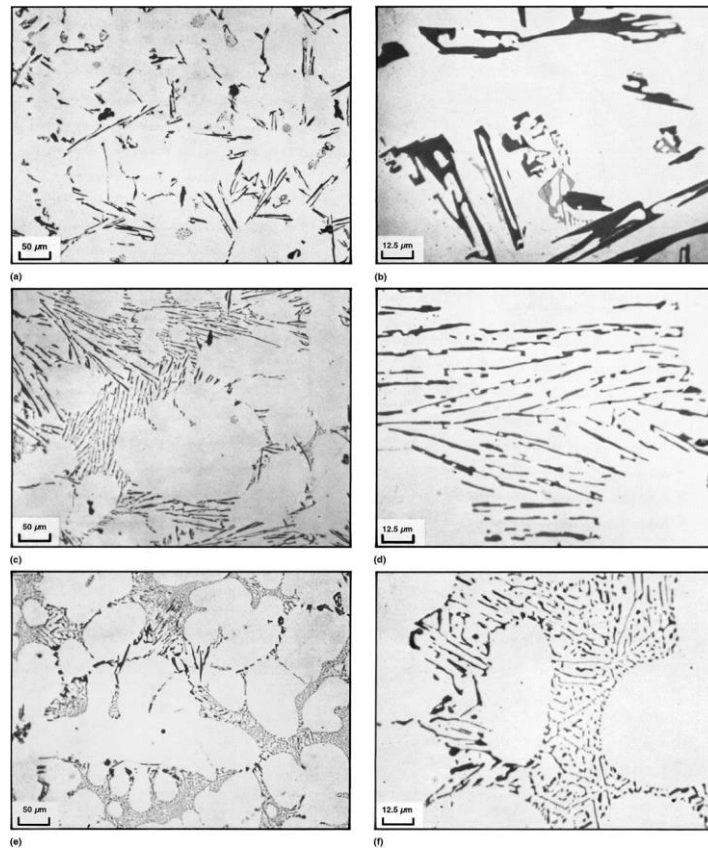


Figure 1.10: Degrés variables de modification de l'eutectique aluminium-silicium **19**

1.2. Magnésium (Mg)

Dans les alliages contenant du magnésium (ex. : Al-Si-Mg), celui-ci forme la phase secondaire Mg_2Si . Cette phase est précipitée soit à l'état brut de coulée, soit lors des traitements thermiques de durcissement par précipitation (notamment le traitement T6). Le Mg_2Si agit comme phase durcissant, conférant à l'alliage une excellente résistance mécanique et une bonne tenue à la fatigue. [21]

1.4. Domaines d'application de l'aluminium et de ses alliages :

. Aéronautique et aérospatial

L'aluminium est largement utilisé pour les structures d'avions (fuselages, ailes) grâce à son excellent rapport résistance/poids.

Alliages courants : 2024, 7075 (alliages à haute résistance).



Figure 1.11: Aéronautique et aérospatial

. Automobile

Utilisé pour réduire la masse des véhicules et améliorer

L'efficacité énergétique (culasses, blocs moteurs, châssis).



Figure 1.12 : Automobile

. Bâtiment et construction

Menuiseries, façades, toitures, structures légères.

Avantages : résistance à

La corrosion, esthétisme, faible entretien.



Figure 1.13: Bâtiment et construction

6.4. Emballage

Canettes, feuilles alimentaires, barquettes.

Alliages utilisés : séries 1xxx, 3xxx.



Figure 1.14 : Emballage

. Électricité et électronique

Câbles électriques, dissipateurs thermiques

Bonne conductivité électrique

(62 % de celle du cuivre, mais bien plus léger).



Figure 1.15: Électricité et électronique

. Industrie navale et ferroviaire

Coques de bateaux, wagons de train à grande vitesse.

Résistance à la corrosion marine (alliages de la série 5xxx).

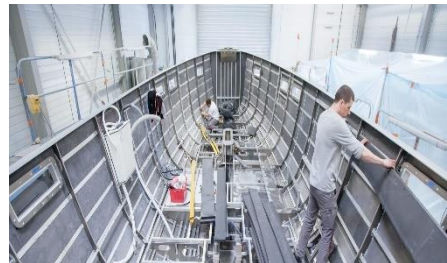


Figure 1.16: Industrie navale et ferroviaire

Chapitre 2 :

Traitements de surface des alliages d'aluminium

CHAPITRE 2 : les traitements de surface des alliages d'aluminium

Introduction

Les alliages d'aluminium sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leur légèreté, de leur haute résistance spécifique et de leur bonne conductivité thermique et électrique. Cependant, leur faible résistance à l'usure et à la corrosion peut limiter leur utilisation dans certaines applications critiques. Ainsi, divers traitements de surface sont appliqués pour améliorer leurs propriétés fonctionnelles, notamment la protection contre la corrosion, l'amélioration de la dureté, l'adhérence des revêtements et l'aspect esthétique [Davis, 1993], parmi celles-ci traitement de surfaces ils y'a :

2.1 Traitement de surface : traitement thermochimique

Le traitement thermochimique est une méthode qui consiste à modifier chimiquement puis mécaniquement la surface des alliages d'aluminium par diffusion d'éléments tels que le carbone ou l'azote à chaud. Ce type de traitement améliore principalement la dureté, la résistance à l'usure et parfois la résistance à la corrosion des pièces.

Le processus débute par un prétraitement de surface par nettoyage et décapage de manière à éliminer toutes impuretés et oxydes pour favoriser une bonne diffusion. Les pièces sont ensuite plongées dans un milieu où les éléments à diffuser (gaz, poudre ou liquide) sont présents et où elles seront soumises à des températures comprises entre 400 et 600 °C. La température et la durée du traitement sont soigneusement maîtrisées afin d'obtenir une diffusion satisfaisante et de contrôler l'épaisseur de la couche formée par le traitement qui, après refroidissement, est soumise à des contrôles qualités pour vérifier les caractéristiques mécaniques obtenues dans le matériau.

Il convient d'indiquer que les deux traitements thermochimiques de l'aluminium les plus fréquents sont :

- **la carburation** permettant la diffusion de carbone pour former des carbures durs et résistants à l'usure.
- **la nitruration** qui autorise la diffusion de l'azote afin de former des nitrures durs et résistants à la corrosion.

Application sur les alliages de fonderie

Les alliages d'aluminium de fonderie, surtout ceux à forte teneur en silicium (Al-Si), peuvent bénéficier de traitements thermochimiques pour améliorer leur résistance à l'usure dans des applications comme des moteurs, des boîtiers de transmission et d'autres composants soumis à des frictions importantes. La carburation et la nitruration sont particulièrement efficaces dans ces applications, car ils offrent une couche de surface dure tout en conservant les propriétés mécaniques du cœur du métal. [22]

2.2 Traitement de surface : Conversion chimique (Chromatation)

Définition

La chromatation est un procédé chimique de conversion de la surface de l'aluminium par immersion dans une solution contenant des composés de chrome hexavalent ou trivalent. Elle forme une fine couche amorphe et protectrice d'oxychlorure ou d'oxyde-chromate sur la surface de l'alliage. Cette couche est conductrice, anticorrosive, et sert souvent d'apprêt pour la peinture ou le collage.

2.2.1 Principe du procédé

Prétraitement :

Dégraissage alcalin → décapage acide → rinçage à l'eau déminéralisée.

Bain de conversion :

Immersion dans une solution de chromates (Cr^{6+} ou Cr^{3+}), parfois avec fluorures ou nitrates.

Réaction chimique entre l'aluminium et les ions chrome :



Formation de la couche passive :

Épaisseur : 0,2 à 2 μm .

Finition : jaune, vert olive, irisé, ou incolore.

Séchage à l'air ou à faible température.

2.2.2 Types de chromatisation :

Chrome hexavalent (Cr^{6+}) : très efficace, mais toxique (réglementé REACH).

Chrome trivalent (Cr^{3+}) : alternative plus respectueuse de l'environnement.

Sans chrome : solutions à base de zirconium, titane, ou silanes (moins efficaces).



Figure 2.1: principe de chromatisation

Application sur les alliages de fonderie

Les alliages d'aluminium de fonderie (surtout Al-Si-Cu) peuvent présenter des porosités ou des inclusions qui affectent l'uniformité du film. Une préparation de surface soignée est indispensable pour assurer une couche homogène. La chromatisation est souvent utilisée avant peinture sur des carters, boîtiers ou pièces aéronautiques non structurelles. [23]

2.3 Traitement de surface : Peinture poudre

Définition

La peinture poudre est un revêtement organique sec appliqué sous forme de poudre thermodurcissable ou thermoplastique, qui est ensuite fusionnée par chauffage pour former un film uniforme et durable. Ce procédé est souvent utilisé pour des applications décoratives et protectrices sur l'aluminium, offrant à la fois des propriétés mécaniques et esthétiques.

Contrairement aux peintures liquides, la peinture poudre ne contient pas de solvants, ce qui la rend plus écologique et économique. Elle est particulièrement efficace pour protéger contre la corrosion et l'usure tout en offrant une grande variété de finitions.

2.3.1 Principe du procédé

. Prétraitement de surface :

Nettoyage et dégraissage, souvent à l'aide de solutions alcalines ou acides.

Parfois, une conversion chimique (par exemple, traitement au phosphate ou au zirconium) est utilisée pour améliorer l'adhérence.

. Application de la poudre :

. Projection électrostatique : la poudre est chargée électriquement et projetée sur la surface de la pièce.

La poudre adhère grâce à l'effet électrostatique.

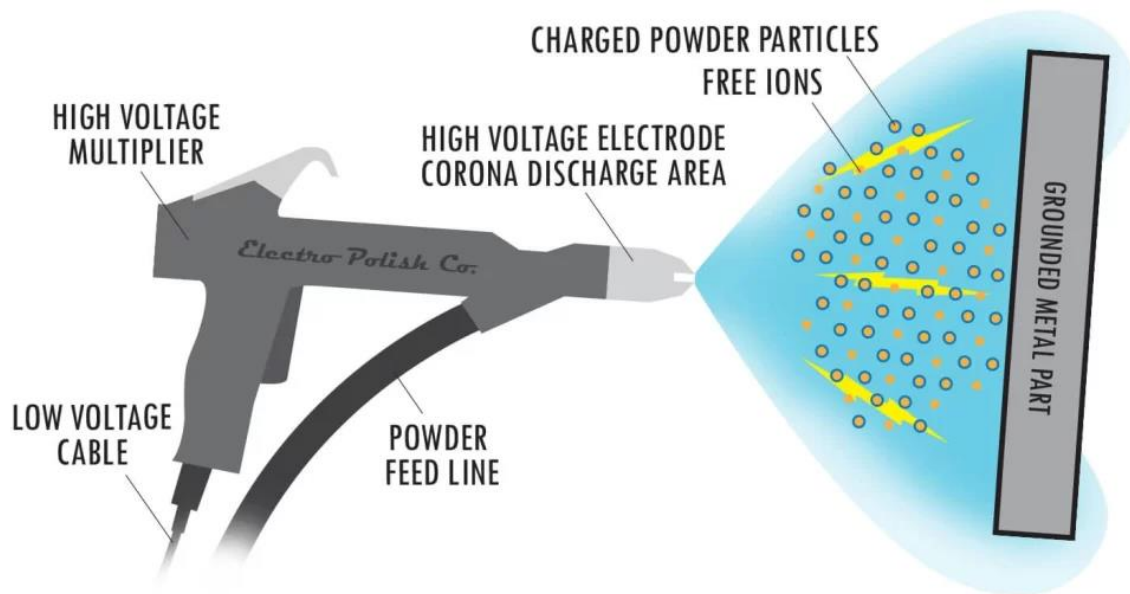


Figure 2.2 : principe peinture poudre

. Cuisson :

La pièce est ensuite chauffée dans un four à 160–200 °C pendant 10 à 20 minutes, ce qui permet à la poudre de fondre, de se mélanger et de former un film solide.

. Refroidissement et contrôle de qualité :

Une fois refroidi, le film est inspecté pour s'assurer qu'il est uniforme, dur, et sans défauts visibles.

Caractéristiques du revêtement

Épaisseur typique : 60 à 120 μm , selon les exigences.

Résistance : bonne résistance à la corrosion, aux chocs et à l'abrasion.

Aspect : disponible en brillant, mat, texturé, métallisé ou même transparent, selon les besoins.

Couleurs : large palette, allant des couleurs unies aux effets spéciaux comme les textures métalliques.

Application sur les alliages de fonderie

Les alliages de fonderie, souvent caractérisés par une teneur élevée en silicium, peuvent poser des défis pour l'adhérence de la peinture poudre en raison des porosités et de l'hétérogénéité de la surface. Un prétraitement de surface rigoureux, y compris un dégraissage et une conversion chimique, est essentiel pour obtenir un revêtement de haute qualité. La peinture poudre est idéale pour des applications décoratives et protectrices sur des pièces de fonderie telles que des boîtiers, carters et structures métalliques. [24]

2.4 Traitement de surface : Électrodéposition (Electroplating)

Définition

L'électrodéposition, ou galvanoplastie, est un procédé électrochimique où un métal (tel que le nickel, le cuivre ou le chrome) est déposé sur une surface métallique (ici l'aluminium) en utilisant un courant électrique. Le métal à déposer est dissous dans une solution électrolytique, et l'aluminium constitue la cathode. Ce traitement est utilisé pour améliorer la résistance à la corrosion, la dureté, l'aspect esthétique et les propriétés électriques des pièces métalliques.

L'électrodéposition permet de créer un revêtement uniforme et résistant, particulièrement efficace pour des applications industrielles nécessitant une protection renforcée ou des caractéristiques spécifiques comme la conductivité ou l'usure.

2.4.1 Principe du procédé :

. Préparation de la surface :

Décontamination de la surface d'aluminium pour éliminer les huiles, oxydes et impuretés.

Une pré-anodisation ou un revêtement intermédiaire (comme un bain de zinc) peut être nécessaire pour améliorer l'adhérence.

. Bain électrolytique :

L'aluminium est immergé dans un bain contenant des ions métalliques (par exemple, Ni^{2+} pour le nickel ou Cu^{2+} pour le cuivre).

Un courant continu est appliqué : l'aluminium est la cathode, et le métal à déposer est l'anode.

Des réactions d'oxydation et de réduction se produisent à la cathode, permettant le dépôt du métal sur la surface.

. Rinçage et finition :

Après l'électrodéposition, les pièces sont rincées pour éliminer tout excédent d'électrolyte et peuvent être passivées ou polies pour une finition de surface.

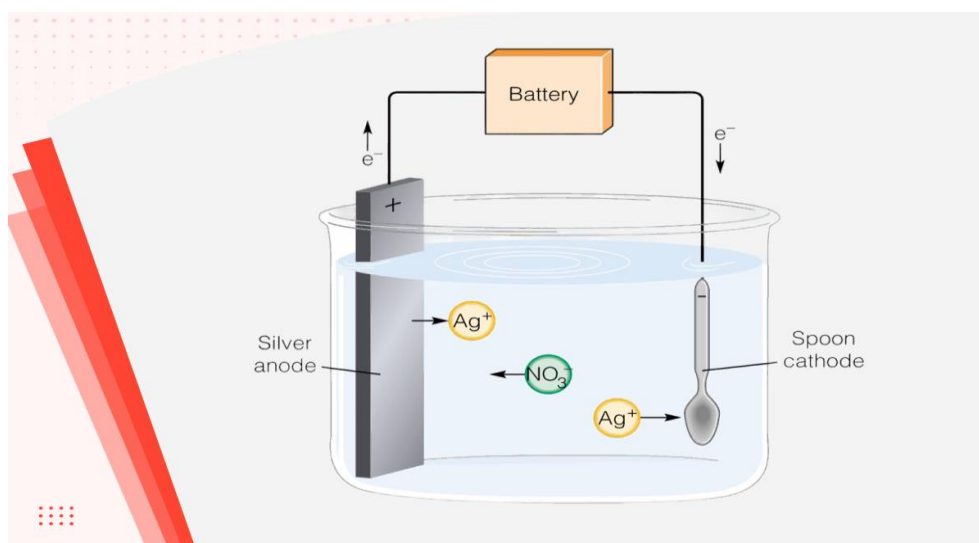


Figure 2.3 : principe d'électrodéposition

2.4.2 Métaux couramment utilisés

Nickel : résistant à la corrosion et à l'usure, utilisé pour des applications décoratives et fonctionnelles.

Cuivre : très bonne conductivité, souvent utilisé comme couche intermédiaire ou pour les composants électriques.

Chrome : donne un aspect brillant et une forte dureté à la surface, utilisé pour des pièces décoratives ou des éléments mécaniques.

Zinc : offre une protection superficielle contre la corrosion, utilisé pour des applications industrielles moins exigeantes. [25]

2.5 Traitement de surface : Dépôts physiques et chimique en phase vapeur (PVD, CVD) sur l'aluminium :

Introduction

Les dépôts en phase vapeur (PVD et CVD) sont des techniques qui permettent de déposer des films minces de matériaux sur une surface métallique (ici, l'aluminium) dans le but d'améliorer ses propriétés, comme la résistance à l'usure, la conductivité, ou la protection contre la corrosion.

2.5.1 Explication des procédés

■ PVD (Dépôt Physique en Phase Vapeur)

Le PVD consiste à vaporiser un matériau (comme du titane, du chrome ou des nitrures) dans un environnement sous vide. Cela se fait par deux méthodes principales :

Évaporation thermique : Le matériau cible est chauffé jusqu'à sa sublimation, et les atomes se déplacent vers la surface de l'aluminium où ils se condensent pour former un revêtement.

Pulvérisation cathodique : Un faisceau d'ions bombardant la cible provoque l'éjection d'atomes qui se déposent ensuite sur l'aluminium.

Ces films sont très minces, mais ils sont très durs et résistants aux rayures.

■ CVD (Dépôt Chimique en Phase Vapeur)

Le CVD implique l'utilisation de gaz réactifs à haute température. Ces gaz réagissent chimiquement sur la surface de l'aluminium pour former un revêtement solide. Le processus est souvent réalisé à des températures élevées (jusqu'à 1000°C), permettant la création de revêtements tels que des céramiques (par exemple, SiC) ou des nitrures (par exemple, TiN).

Les couches déposées par CVD sont souvent plus épaisses et peuvent offrir une résistance supérieure à la chaleur et une protection accrue contre l'usure.

Applications

Les procédés PVD et CVD sont utilisés dans :

La fabrication d'outils de coupe en aluminium (pour augmenter la durée de vie des outils).

Des composants électroniques et électriques, comme les connecteurs.

Des pièces de précision en aéronautique et automobile, où des revêtements fins et résistants sont nécessaires. [26] [27]

2.6 Traitement de surface : Passivation de l'aluminium

Définition

La passivation de l'aluminium est un traitement chimique visant à renforcer la couche d'oxyde naturelle qui se forme à la surface du métal lorsqu'il est exposé à l'air. Cette couche d'oxyde, naturellement formée, protège l'aluminium contre la corrosion et l'attaque chimique. Le procédé de passivation permet de la rendre plus épaisse et plus dense, augmentant ainsi la résistance à la corrosion et la durabilité des pièces en aluminium.

La passivation ne modifie pas de manière significative les propriétés mécaniques de l'aluminium, mais elle améliore sa résistance chimique, rendant ce traitement particulièrement utile dans des environnements modérément agressifs.

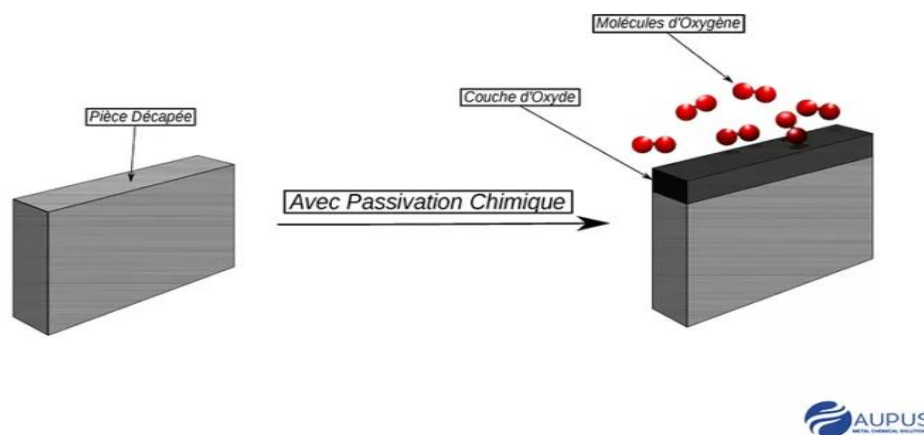


Figure 2.4 : passivation de l'aluminium

2.6.1 Principe du procédé

Nettoyage préalable :

Dégraissage à l'aide d'un détergent ou d'une solution alcaline.

Décapage acide (acide nitrique, acide sulfurique dilué) pour éliminer les oxydes existants et autres contaminants.

Bain de passivation :

L'aluminium est immergé dans une solution acide, souvent de l'acide nitrique, ou dans une solution contenant des inhibiteurs de corrosion comme des fluorures ou des nitrates.

La durée du bain varie de quelques minutes à une demi-heure, à température ambiante (15–25 °C).

Cette étape permet de former une couche d'oxyde dense, inaltérable et plus résistante aux attaques corrosives.

Rinçage et séchage :

Un rinçage à l'eau déminéralisée est effectué pour éliminer les résidus de la solution de passivation.

La pièce est ensuite séchée soigneusement pour éviter toute contamination.

2.6.2 Effets sur la surface

Renforcement de la couche d'oxyde naturelle d'aluminium (qui peut atteindre jusqu'à 5 micromètres d'épaisseur).

Amélioration de la résistance aux attaques acides et basiques.

Propriétés anti-corrosion accrues, notamment dans des environnements industriels ou marins modérés.

Aspect transparent et mat.

La passivation peut également améliorer l'adhérence des peintures ou des colles si la pièce est destinée à une finition ultérieure.

Application sur les alliages de fonderie

Les alliages d'aluminium de fonderie (ex. Al-Si) peuvent présenter des porosités qui affectent la formation d'une couche uniforme d'oxyde lors de la passivation. Un dégraissage approfondi

et un décapage acide minutieux sont donc essentiels pour garantir l'efficacité du traitement. Ce procédé est largement utilisé dans les industries aérospatiale et automobile, ainsi que pour les composants électroniques où la protection contre la corrosion est critique sans modification des propriétés esthétiques ou dimensionnelles des pièces. [28]

2.7 Traitement de surface : anodisation

Introduction

Les traitements d'anodisation sont couramment utilisés pour protéger l'aluminium et ses alliages contre la corrosion, mais également pour modifier et améliorer leurs propriétés de surface en fonction des applications visées.

Ce procédé repose sur un comportement électrochimique spécifique de l'aluminium, qui se distingue par sa tendance naturelle à former une couche d'oxyde protectrice. L'anodisation permet de renforcer et contrôler cette couche, en agissant sur sa structure, sa porosité et son épaisseur, grâce à des conditions opératoires bien définies.

La nature de l'électrolyte, la température, ainsi que les paramètres électriques sont autant de facteurs qui influencent la qualité de la couche formée et ses performances en usage réel.

2.7.1 Définition de l'anodisation

L'anodisation est un traitement de surface électrochimique destiné à protéger, améliorer ou décorer les pièces en aluminium. Elle repose sur le principe de l'oxydation anodique, qui génère une couche d'oxyde électriquement isolante à la surface du matériau.

Cette couche confère à l'aluminium une résistance accrue à l'usure, à l'abrasion et à la corrosion.

L'épaisseur de la couche formée varie en fonction de la nature de l'alliage, de la durée du traitement et surtout de la destination finale du produit. [29]

). Ce procédé est largement utilisé dans les secteurs aéronautique, architectural, électronique ou encore automobile.

2.7.2 Préparation de surface

Avant d'entamer le processus d'anodisation, il est essentiel de préparer correctement la surface de l'aluminium. Cette étape garantit l'adhérence, l'uniformité et la qualité de la couche d'oxyde.

La préparation implique différents traitements mécaniques, chimiques ou électrolytiques, parmi lesquels figurent le dégraissage et le décapage.

Dégraissage

Le dégraissage a pour objectif d'éliminer les impuretés organiques (huiles, graisses) présentes à la surface. Il peut être réalisé :

Soit dans des solvants organiques chlorés, souvent utilisés pour les pièces de grande taille, généralement en phase vapeur.

Soit dans des solutions aqueuses contenant des agents détersifs ou mouillants, adaptées aux pièces de petites dimensions.

Dans tous les cas, les dégraissants utilisés doivent être totalement inertes vis-à-vis de l'aluminium, afin de ne pas altérer la surface du métal. [30]

Décapage

Le décapage consiste à éliminer la couche d'oxyde naturellement formée à la surface de l'aluminium au contact de l'air. Ce traitement se fait en deux étapes :

Une première solution élimine efficacement les traces d'oxydes préexistants.

Une seconde solution vise à prévenir la reformation immédiate de cette couche d'oxyde avant l'anodisation proprement dite. [31]

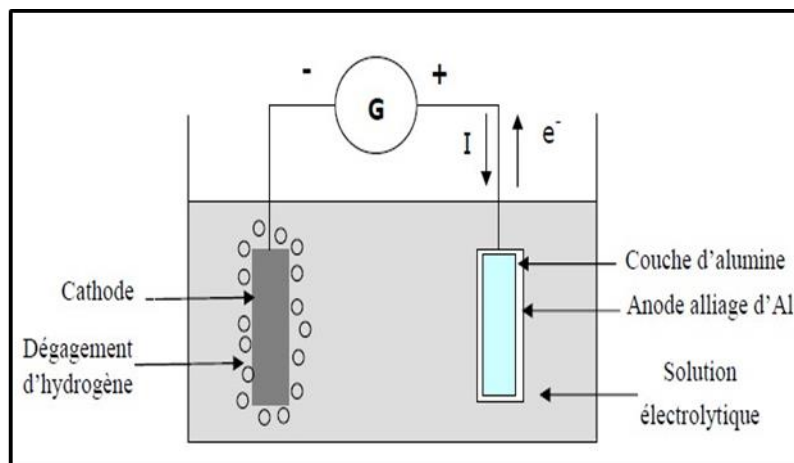
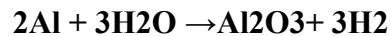
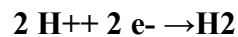


Figure 2.5 : principe de l'anodisation

La réaction globale d'oxydation anodique de l'aluminium en milieu acide habituellement avancée est :



A la cathode, un dégagement d'hydrogène provenant de la réduction des protons a lieu selon la réaction :



A l'anode, plusieurs étapes sont proposées pour former l'oxyde d'aluminium :



La couche anodique se compose de deux zones distinctes :

. La couche barrière (ou couche compacte) :

Des anodisations de type barrière peuvent être réalisées sous une densité de courant constante, dans un électrolyte qui n'a pas d'action dissolvante sur le métal, ni sur son oxyde (solutions à base d'acide borique, d'acide tartrique, d'acide citrique, de tartrate d'ammonium, de carbonate de sodium...). Dans ce cas, lors d'une oxydation galvano statique, traduisant une croissance homogène. Des études ont montré que le film d'oxyde se développe de manière uniforme, en suivant la rugosité de la surface. Sous l'effet du champ électrique créé lors de la polarisation de l'échantillon, le film anodique se forme par migration des ions Al^{3+} de l'interface métal/film vers l'interface film/électrolyte et par migration des ions O_2^-/OH^- .

. La couche poreuse :

elle constitue la majeure partie de la couche anodique (de quelques microns à plus de 100 μm selon le type d'anodisation). Elle est formée de nanocanaux cylindriques verticaux, régulièrement disposés, perpendiculaires à la surface du substrat. [32]

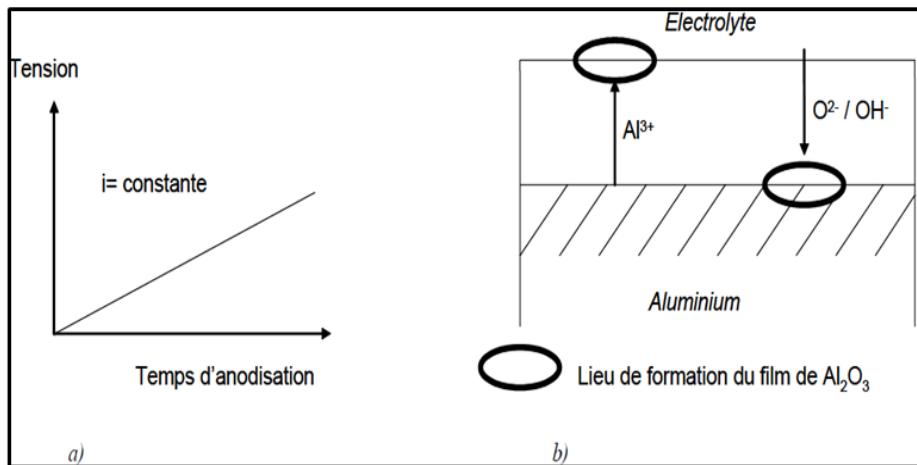


Figure 2.6 : Réponse en tension pour une anodisation de type barrière sous densité de courant constante, b) Représentation schématique de la croissance d’une couche anodique de type barrière

. [33]

Anodisation de type poreux :

Lorsque l’électrolyte utilisé a une action dissolvante sur le métal ou son oxyde (cas des acides chromique, sulfurique, oxalique...), la formation de la couche anodique résulte d’une compétition entre deux phénomènes (PERNOT-GEHIN, 2007) : la formation de l’oxyde par action du courant ; la dissolution chimique simultanée de cet oxyde.

Cette concurrence donne naissance à une couche anodique poreuse, dite duplex, où un film d’oxyde se forme sur le métal, tandis qu’une dissolution lente génère des pores dans la couche.

Le processus se déroule en plusieurs étapes :

Étape I : Formation initiale d’une couche barrière compacte dès l’application de la tension. Cette étape s’accompagne d’une chute de courant (en mode potentiostatique) ou d’une montée de tension (en mode galvanostatique).

Étape II : Début de la dissolution chimique de l’oxyde, provoquant de fines fissures à la surface, sous l’effet de l’électrolyte.

Étape III : L’oxyde continue de croître, et de multiples microporosités apparaissent. Certaines évoluent en pores définitifs, s’élargissant du côté de la couche barrière, à mesure que l’électrolyte attaque l’interface.

Étape IV : Stabilisation du système (courant ou tension constante), correspondant à la croissance régulière de la structure poreuse. [33]

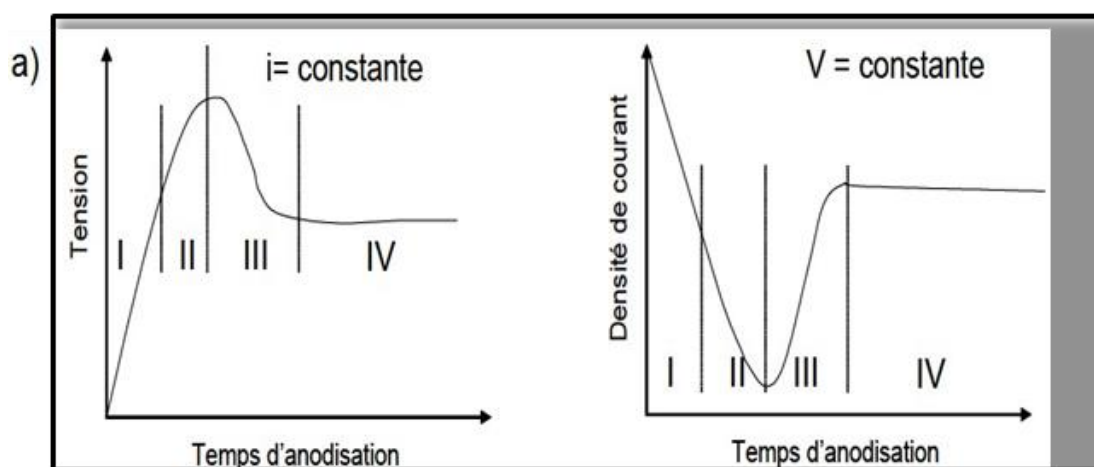


Figure 2.7 : Réponse en tension ou en densité de courant pour une anodisation de type poreux,

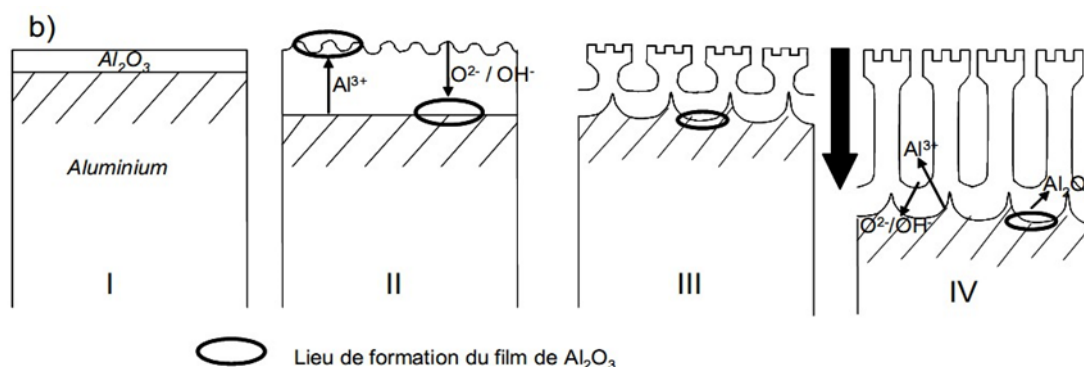


Figure 2.8 : Représentation schématique de la croissance d'une couche anodique de type poreux

Keller et al. , en utilisant la microscopie électronique en transmission, ont montré que, quelle que soit la nature de l'électrolyte (acide chromique, phosphorique ou oxalique ou sulfurique), la couche de pores formée lors de l'anodisation présente une structure colonnaire identique, mais la dimension des pores varie selon les conditions de formation. Le nombre de pores au cm^2 est plus élevé si l'anodisation est faite dans l'acide sulfurique (77×10^9 pores/ cm^2) que dans l'acide chromique (22×10^9 pores/ cm^2) ou phosphorique (19×10^9 pores/ cm^2) ; avec en outre les diamètres de pore qui est de 120 Å, 240 Å et 330 Å pour l'acide sulfurique, chromique et phosphorique respectivement. La taille des cellules et celle des pores sont proportionnelles à

la tension appliquée lors de l'anodisation. La couche barrière est d'autant plus épaisse que l'électrolyte est concentré au maximum (14 Å/V). 34

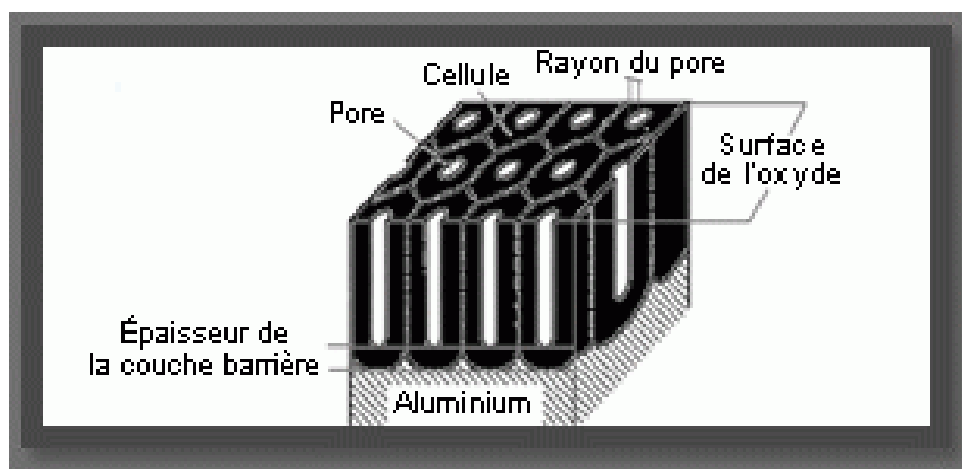


Figure 2.9 : schéma d'une structure de couche d'oxyde

2.7.3 Conditions d'anodisation :

Tableau 3:les conditions d'anodisation

Condition d'anodisation		Nombre de pores (en 10^9 /cm ²)	Epaisseur de la couche barrière (nm/v)
Electrolyte	tension		
Acide sulfurique 15%'en masse) à 10°C	15	76	1.00
	20	52	
	30	28	
Acide oxalique 2% (en masse) à 25°C	20	35	1.18
	40	11	
	60	6	
Acide chromique 3% (en masse) à 50°C	20	22	1.19
	40	8	
	60	4	
Acide phosphorique 4% à 25°C	20	19	1.25
	40	8	
	60	4	

2.7.4 Principaux procédés d'anodisation :

2.7.4.1 Anodisation sulfurique :

Brevetée pour la première fois en Angleterre en 1927, l'anodisation en milieu sulfurique est aujourd'hui la plus répandue industriellement, essentiellement pour trois raisons :

- le faible coût de l'électrolyte ;
- le large domaine d'utilisation du procédé ;

La maîtrise aisée des paramètres de traitement.

Ceci ne doit pas faire oublier que dans chaque domaine considéré, les conditions opératoires sont précisément définies. Selon la fonction recherchée, on classe l'anodisation

Sulfurique en trois grandes catégories :

- l'anodisation de décoration ;
- l'anodisation de protection ;
- l'anodisation dure.

Paramètres de l'anodisation :

. La densité de courant :

La densité de courant fait un rôle important sur l'anodisation, si la densité plus élevée plus l'anodisation est rapidement faite, si la densité faible l'anodisation fait plus long ce qui entraîne de faire une épaisseur faible.

Tension :

Après environ 12.5μ, les effets de la tension sur la densité de courant commencent à être perceptibles, avec une densité de courant qui décroît tandis que le revêtement se forme, l'augmentation de la tension nécessaire pour maintenir la densité de courant dépend de l'alliage.

. Concentration d'acide sulfurique :

La meilleure concentration d'acide sulfurique pour l'anodisation est entre **180 g/l et 200 g/l** a cause d'une voire dans figure.

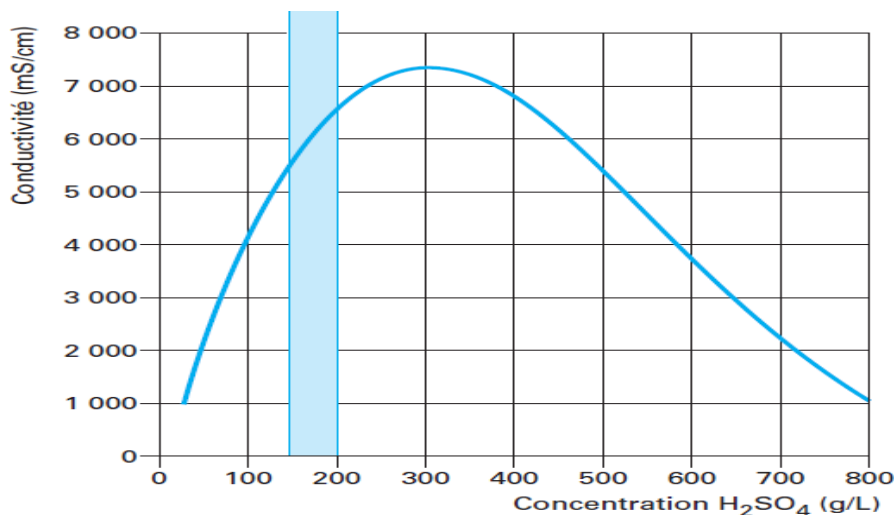


Figure 2.10 : conductivité d'acide sulfurique en fonction de sa concentration

Température :

Les températures utilisées pour l'anodisation sulfurique sont entre **18 et 29 °c**.

. Le temps d'anodisation :

D'après les expériences passées, on dit que le temps idéal d'anodisation sulfurique est 40 min, si la durée plus longue peut faire une dissolution de revêtement.

2. Effet des éléments d'additions sur anodisation (pour les alliages d'aluminium de fonderie) :

Les alliages d'aluminium de fonderie sont constitués d'éléments d'addition, tels que le silicium (Si), le cuivre (Cu), le magnésium (Mg) et le fer (Fe), qui ont tous un impact direct sur la qualité de la couche anodique formée.

Silicium (Si) :

En quantité importante dans les alliages de fonderie (jusqu'à 12 %), le silicium n'est pas oxydé lors de l'anodisation ; il apparaît plutôt sous forme de particules libres qui se traduisent par des zones sombres ou grises dans la couche anodique, ce qui va à l'encontre de

l'homogénéité de la couche et altère son adhérence à son substrat métallique. Plus sa concentration est forte, plus la qualité de l'anodisation est affectée.

Cuivre (Cu) :

Le cuivre a pour fonction de modifier les propriétés mécaniques, mais il perturbe le processus anodique en formant des composés dont la résistance à la corrosion est faible. La couche anodique est par conséquent teintée de brun foncé, elle devient poreuse et peu protectrice

Magnésium (Mg) :

Il améliore la qualité de l'anodisation à condition qu'il soit bien équilibré avec le silicium ; dans les alliages Al-Si-Mg, le magnésium favorise l'édification d'une couche anodique épaisse, homogène et résistante à la corrosion.

Fer (Fe) :

Souvent présent dans les alliages d'aluminium comme impureté, il s'oxyde peu car il ne forme pas de composés oxydables, tels que AlFeSi. Sa présence altère la morphologie de la couche anodique. [35]

2.7.4.2 Oxydation Anodique Chromique (OAC) :

L'anodisation chromique, mise au point dès **1923** dans le procédé **Bengough-Stuart**, est l'un des tout premiers traitements électrochimiques de l'aluminium. Elle se développa donc de concert avec l'anodisation sulfurique mais présente principalement plusieurs spécificités. En particulier les couches qui se forment sont beaucoup plus minces (dans une fourchette d'épaisseur de **2 à 7 µm**) d'où un problème de tolérance dimensionnelle moindre, et le traitement a peu d'influence sur les propriétés mécaniques des pièces tout en offrant un bon coefficient de frottement. En revanche sa résistance à l'abrasion est moindre que celle de l'anodisation sulfurique. Un grand avantage de l'anodisation chromique est par contre l'adhérence des revêtements organiques (peintures et colles) que le traitement favorise. Enfin sur le plan technique, le bain a une température plus importante (**40 à 50 °C**) et contient typiquement entre **30 et 50 g/L de CrO₃**. Les couches sont beaucoup plus poreuses, plus ramifiées, ce qui favorise la fixation des revêtements mais limite leur utilisation sous des effets d'abrasion forte. **36**

2.7.4.3 Oxydation Anodique Dure (OAD)

L'oxydation anodique dure (OAD) est un process électrochimique qui permet l'obtention d'une couche d'oxyde d'aluminium d'une épaisseur importante **40 à 100 µm** et d'une dureté élevée **400 à 600 HV** grâce à l'utilisation d'un électrolyte à base d'acide sulfurique concentré **250 à 300 g/L** sous des conditions sévères de basse température entre **-5°C et 0 °C** et de forte densité de courant **2 à 4 A/dm²**, pouvant aller **jusqu'à 20 à 80 V**, durant une durée de traitement de l'ordre de **40 à 60 minutes**. Les couches d'oxyde ainsi obtenues se caractérisent par d'excellentes propriétés thermiques et électriques ainsi qu'une bonne résistance à l'abrasion et à la corrosion, ce qui rend ce procédé très bien adapté à des applications techniques exigeantes.

2.7.4.4 Oxydation phosphorique :

L'anodisation phosphorique est un traitement qui a pour fonction principale l'accrochage des colles et peintures. On obtient ainsi une couche très mince et très poreuse, favorisant l'adhérence du revêtement organique, en plongeant la pièce dans un bain d'acide phosphorique à environ **10 %** pendant **20 à 25 minutes**, à température ambiante **25 °c** et sous une haute tension **70 à 100 V**. L'objectif du traitement n'est ainsi pas de protéger contre les agressions dans le cas présent, mais de préparer la surface pour des systèmes multicouches comme (colle, peinture) et se couple souvent avec d'autres traitements comme le PRIMUS (Phosphoric acid anodizing combined with primer application). [36]

Chapitre 3

Etude expérimentale

Introduction :

Dans cette partie on parle exactement sur élaboration d'un alliage d'aluminium de fonderie étape par étape, après on a un objectif d'étudier de cet alliage de fonderie Al Si Cu a un traitement de surface qui s'appelle anodisation sulfurique, ce traitement fait un rôle important d'élimination des oxydes de l'effet de la couche anodisé.

Partie 1 : élaboration de la pièce

. Dans cette partie on parle de toutes les étapes pour élaborer un alliage d'aluminium de fonderie :

1.1 Etape 1 :

Cette étape est plus importante, c'est de choisir les nuances de l'alliages.

On à choisir les pourcentages suivants :

7% Si, % Cu < 3 %, % Fe < 0.7 %.

1.2 Etape 2 :

Dans cette partie d'élaboration on à préparer l'élément principale (aluminium) et les éléments d'addition (silicium et cuivre) pour travailler sur un alliage d'aluminium de fonderie (Al Si Cu)

A) on à prendre une quantité des pierres de silicium avec pourcentage faible de magnésium, on a les casser jusqu'à devienne fin.



Figure 3.1 : pierre de silicium



Figure 3.2: étape de casser

B) prendre à partir d'un lingot du cuivre la quantité qui effectué le pourcentage quand n'a choisir

C) dans cette étape, le four a été mis en fonctionnement jusqu'à chauffé le creusé, s'est à base de graffite, après on mettre l'aluminium avec la poudre de silicium et le cuivre dans le four, et surveillance jusqu'à fusionne après mesure la température de coulée jusqu'à atteinte la température 750 °c .



Figure 3.4 : four ON



Figure 3.3: four entrain de fusionné

1.3 Etape 3 :

Vérification des résultats des nuances dans laboratoire

Au cours de cette étape, on prend un échantillon du métal en fusion a été prélevé et transmis au laboratoire pour l'analyse de la composition chimique par le spectromètre

Composition chimique de l'alliage :

Programme : Al-01-m

122288/07

006 21 :3828

Commentaire : Al-Global

Eléments : Concentration

Moyenne (n=3)

Tableaux :

Alliage	% Des éléments								
AL-CU-SI	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Ti	Zn	Al
	3.52%	0.268%	0.314%	6.44%	0,79%	0.027%	0.340%	0.75%	<87.7%

Tableau 4: résultat des nuances d'un alliage d'aluminium

Le spectromètre :

Un spectromètre est un instrument scientifique utilisé pour mesurer et analyser la lumière (ou plus généralement, le rayonnement électromagnétique) émise, absorbée ou réfléchiée par une substance. Il permet de décomposer un rayonnement en ses différentes longueurs d'onde (ou fréquences) afin d'en obtenir le spectre, c'est-à-dire la signature optique ou chimique d'un matériau.

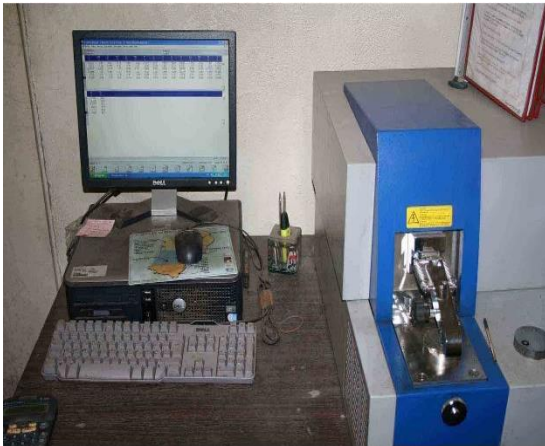


Figure 3.6 : spectromètre

Programme: Al-01-M
Commentaire: Al-Global
Moyenne (n=3)

122288/07

306 21 3828

Eléments: Concentration

Sample No:
Sample Id:

Quality:

Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Ni %	Zn %
x 6.44	0.79	3.52	0.314	0.268	0.027	0.030	0.75
Ti %	Ag %	B %	Ba %	Be %	Bi %	Ca %	Cd %
x 0.046	0.0015	0.0041	0.002	0.0006	<0.0010	0.0018	0.0012
Ce %	Co %	Ga %	La %	Li %	Na %	P %	Pb %
x 0.0040	0.0034	0.0066	0.0012	<0.0001	0.0003	<0.0010	0.032
Sb %	Sn %	Sr %	V %	Zr %	Hg %	Al %	
x 0.017	0.0036	0.0001	0.0041	0.0056	<0.0020	<87.7	

CS Scanned with CamScanner

Figure 3.5: résultat de la composition chimique

1.4 Etape 4 :

Préparation de moule, Nous avons préparé un simple moule de 10cm x 10cm avec une épaisseur de 2cm, le moule doit y avoir un sable plus bentonite, préparation de moule doit être avec (des attaques, le cul d'œuf, étirage de l'air, jet de coulée, godet de coulée.)



Figure 3.7 : moule prêt



Figure 3.8: sable + bentonite



Figure 3.9 : bentonite

1.5 Etape 5 :

Nous avons prêt à la coulée et finition de matériaux brut



Figure 3.10 : le coulage



Figure 3.11 : principe de coulage

Après la solidification de pièce on ouvrir le moule, après enlève les augmentations laissées par le moule (les étirages d'air, les masselottes...) comme vous voir dans les photos :

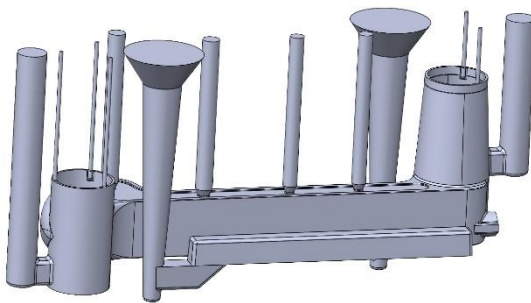


Figure 3.13 : Schéma d'une pièce après la coulée



Figure 3.12 : pièce brute après la coulée

Ainsi, à partir de cette étape, nous récupérons le substrat (l'alliage d'aluminium de fonderie (Al Si Cu) que nous soumettrons au traitement de surface dans la deuxième partie.



Figure 3.14 : pièce après les éliminations

2 Partie 2 : le traitement de surface (anodisation sulfurique)

A cette partie de processus, l'objectif est d'étudier en détail le procédé d'anodisation sulfurique appliqué à un alliage de fonderie Al Si Cu (on a déjà été élaboré), après une préparation de la surface du substrat, nous allons procéder à une analyse progressive de cette technique de traitement de surface. L'étude portera sur les paramètres clés tels que la concentration de l'acide sulfurique, la température de l'électrolyte, la densité de courant, le temps d'anodisation, ainsi que effets de ces paramètres sur l'épaisseur et la qualité de la couche anodique. Cette approche méthodique vise à optimiser les propriétés de la couche formée, notamment la résistance à la corrosion, la dureté, et l'adhérence aux revêtement secondaires si nécessaire.

2.1 Dispositifs expérimentaux des dépôts :

2.1.1 Produits chimiques :

Tableau 5:liste des produits chimique utilisées

Les produits	La formule chimique
Dégraissant	
Hydroxyde de sodium	NaOH
Eau distillée	H₂O
Acide nitrique	HNO₃
Acide sulfurique	H₂SO₄

Matériaux :

Le matériaux utilisé alliage d'aluminium de fonderie, avant de la préparation de surface nous avons coupé la plaque du substrat (10 x 10) cm en 9 échantillons. Par suit, nous avons percé l'échantillon afin de permettre son accrochage pendant le processus.



Figure 3.15 : après de couper

2.1.2 Les outils utilisés :

A-Bain électrolytique

Utilisé un bain conducteur électrique

Acier inoxydable



Figure 3.16 : bain de inox

B-bain aux plastiques

Utilisation d'une boîte

En plastique



Figure 3.17 : bain en plastique

C-Source de courant continu :

Chargeur de batterie auto

Type : redresseur (rectifier) avec contrôle de tension et d'intensité

Tension : typiquement de 12 à 24 V

Densité de courant : 5 à 7 A/dm²

Outils associés : câbles résistants à la corrosion, connecteurs en titane ou en aluminium



Figure 3.18 : générateur

D-fils en aluminium :

E- cathodes utilisés :

. Une plaque en aluminium pur et une plaque en plomb, et avec le bain inox



Figure 3.20 : plomb



Figure 3.19 : aluminium pur

2.2 Installation de processus

Le processus d'anodisation a été réalisé selon deux configurations distinctes. Dans un premier temps, un bac en inox a été utilisé, ce dernier jouant également le rôle de cathode. L'échantillon en aluminium, placé au centre du bac et immergé dans une solution d'acide sulfurique (électrolyte), faisait office d'anode.

Dans un second temps, un bac en plastique a été employé. Une plaque métallique, en aluminium ou en plomb (selon l'essai), ont été utilisée comme cathode et placée dans la solution.

Dans les deux cas, les cathodes étaient reliées entre elles à l'aide d'un câble conducteur en aluminium, puis connectées à la borne négative du générateur de courant. L'anode (l'échantillon) était branchée à la borne positive.

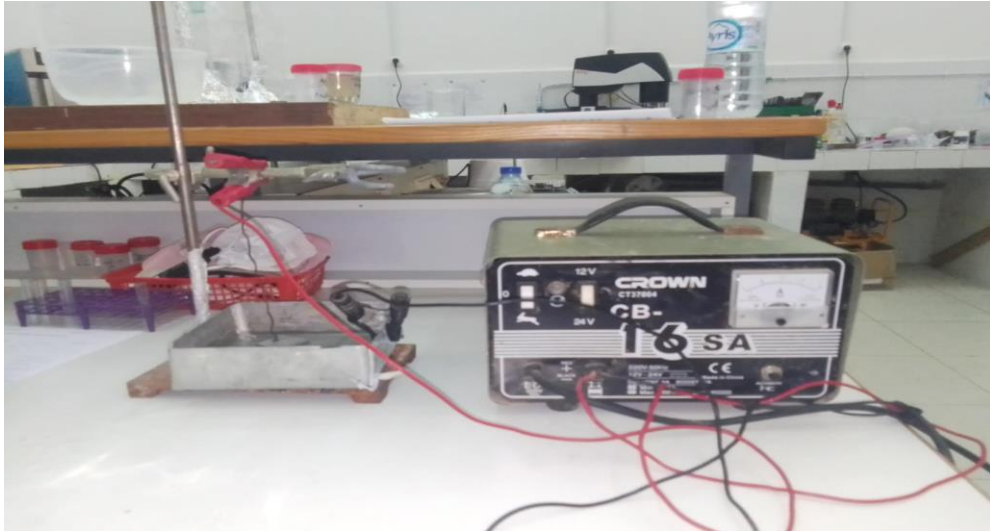


Figure 2.21 : principe de l'anodisation

2.3 Préparation de surface :

Dans le cadre de ce travail, nous avons préparées les échantillons (alliage d'aluminium Al Si Cu) type fonderie selon le protocole d'éliminer la couche d'oxyde et de rugosité visant à optimiser l'uniformité et l'adhérence de la couche anodique. La préparation de surface a été réalisée en plus étapes, décrites comme suit :

D'abord on fait un polissage léger a papier 80

2.3.1 Dégraissage

Cette opération on a utilisé afin d'éliminer les traces des huiles, de graisses et de contaminants organiques, on a utilisé un dégraissant ménager, après 3 min de dégraissage on a immergé les échantillons dans l'eau déminéralisé.



Figure 2.22 : procédé de dégraissage

2.3.2 Décapage :

Ce processus utilise à fin d'éliminer les oxydes superficiels par une solution d'acide basique, On n'a préparé une solution de la soude (NaOH) avec de l'eau déminéralisé à 50°C, on a immergé un échantillon dans la solution pendant 10 min, cette partie permet de retirer les oxydes, et formation d'une surface noire.



Figure 2.23 : procédé de décapage

La neutralisation :

L'opération s'effectue une objective à éliminer la couche d'oxyde superficiel, après d'une solution de 50 ml d'acide nitrique avec 50 ml l'eau distillé pendant 10 min, à température 25°C



Figure 2.24 : préparation d'acide

2.4 Anodisation :

Le principe de l'anodisation repose sur un traitement électrochimique destiné à générer une couche d'alumine ; celle-ci se trouve formée à la surface de l'aluminium et de ses alliages selon un procédé fondamentalement reposant sur la technologie électrolytique. Dans une cellule d'électrolyse, si l'on connecte à la borne positive (anode) une plaque, elle-même l'alliage d'aluminium, et à la borne négative d'un générateur de courant une plaque métallique (plomb ou aluminium, inox ...) alors, il ne se produit aucun dégagement gazeux sur l'aluminium : l'hydrogène est dégagé à la cathode. En effet, dans une électrolyse, dans une solution d'acide sulfurique, en considérant dans le traitement germanique évoqué dans les sections précédentes la décharge, à l'anode des ions SO_4^{2-} et des ions O_2^- , on peut en déduire selon leurs potentiels de décharge que les ions O_2^- présents sont préférentiellement à la décharge à l'anode, ce qui nous amène à envisager la même forme d'oxydation, l'oxygène alors naissant à l'anode dans sa forme extraordinairement active O_2^- se polymérisera avec l'aluminium pour former les solides Oxyde d'aluminium Al_2O_3 . Ce phénomène de formation de ce film peut finalement se décrire comme m'oxydation directe.

2.4.1 Préparation de l'électrolyte d'anodisation

Pour réaliser l'anodisation sulfurique des pièces en alliage d'aluminium, nous avons utilisé un électrolyte à base d'acide sulfurique, préparé à une concentration de 200 g/L en acide pur. Ce choix permet de maintenir un bon équilibre entre la formation de la couche d'oxyde (alumine) et sa légère dissolution, ce qui favorise l'apparition de pores à la surface. Ces pores jouent un rôle important, car ils facilitent la progression du courant à travers la couche, permettant ainsi d'obtenir une anodisation plus uniforme et plus épaisse.

L'acide sulfurique utilisé provient d'une solution concentrée à **96 %** en masse, avec une densité **de 1,82 g/ml**. Pour obtenir la concentration souhaitée, nous avons calculé le volume à prélever à l'aide de la formule

$$V = C / (p \times d)$$

Concrètement, nous avons mesuré **114 ml** d'acide sulfurique concentré, que nous avons versés lentement dans environ **800 ml** d'eau distillée, en prenant soin d'agiter doucement la solution pendant l'ajout. Une fois le mélange refroidi, nous avons complété le volume à 1 litre avec de l'eau distillée.

Précaution essentielle : l'acide a toujours été ajouté à l'eau, et non l'inverse, afin d'éviter tout risque d'ébullition violente ou de projections.

2.4.2 Paramètre d'anodisation :

2.4.2.1 Densité de courant :

Tableau 6: paramètre d'anodisation

Paramètre	Valeur
Surface anode	28 cm ²
Courant recommandé ($J = 0,015$ A/cm ²)	5A
Courant max possible ($J = 0,25$ A/cm ²)	7 A
Tension	12 V et 24 v

Le courant utilisé d'après la surface de l'anode et la densité de courant est 5 A est constant mais on a changement de la tension 12v 24v .

2.4.2.2 La durée d'anodisation :

Après la réalisation de notre réglage de courant et de tension, on à choisir un fix qui 50 min, après on récupère l'échantillon et immergé dans l'eau distillé puis séché.

2.4.2.3 La température :

La préparation de l'électrolyte (acide +eau) peut augment la température, nous avons contrôler par un bain d'eau froid, Nous travaillons à maintenir la solution à température ambiant.

. Différents échantillons de point de vue de la tension et de la cathode :

Tableau 7:différente échantillon

Échantillon	Tension	Cathode
1	24 v	Pb
2	12 v	Inox
3	12 v	Pb
4	12 v	Al

2.5 Préparation métallographique :

2.5.1 Enrobage :

Cette opération permet d'enrober les échantillons quant à anodes, après du fait d'un coupe transversal (1 cm pour chaque échantillon), on fait un enrobage froid (résine + durcisseur), cette opération afin de facilite les manipuler durant le polissage.



Figure 2.25 : opération d'enrobage

2.5.2 Polissage :

Cette opération ayant un objectif de d'amélioration d'état de surface d'un matériau, il vise à obtenir une surface lisse, brillante et homogène, soit pour raison d'observation de la microstructure.

On a fait un polissage avec papier 80 jusqu'à 2000.

Après le polissage de papier, on fait la finition avec une pate diamanté.

2.6 Microscopie :

Cette opération utilisée après le polissage, de but d'observé les phase de cet alliage et calculer la couche anodes formée, ce microscope est un appareil photo numérique relire avec un ordinateur



Figure 2.27 : microscope optique

Chapitre 4

Résultat et discussion

Introduction

L'alliage Al-Si-Cu étudié a été élaboré par fusion et coulé en moule métallique. Une observation au microscope optique a permis d'analyser sa microstructure ainsi que l'évolution de la surface après anodisation sulfurique. L'objectif est d'identifier les phases présentes, évaluer la formation de la couche d'oxyde et étudier l'influence de la nature des cathodes sur son épaisseur.

4.1 Microstructure :

La figure 4.1 montre la microstructure de l'alliage élaboré sous microscope optique. On note des particules de Silicium secondaire (eutectique) à la forme lamellaire/aciculaire, d'une taille standard de plusieurs dizaines de micromètres. On constate l'absence de la phase de Silicium primaire, ce qui est attendu puisqu'il s'agit d'un alliage hypo-eutectique. (Fig 4.2) montre le diagramme de phase Al-Si)

Pour ce qui est des phases intermétalliques, on observe les phases α -Fe (sous forme d'écritures chinoises) et β -Fe (longues Aiguilles)

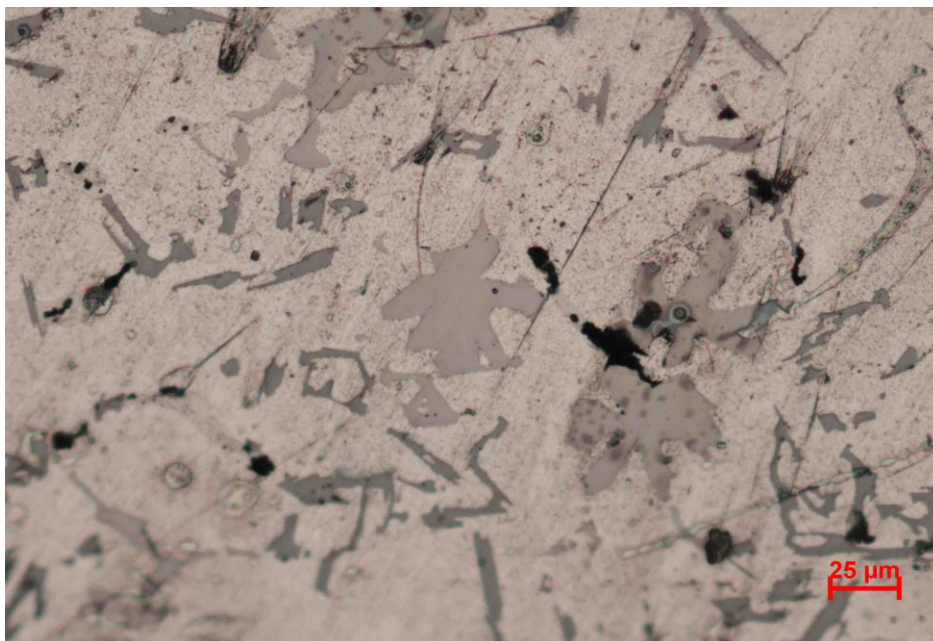


Figure 4.1: microstructure d'alliage

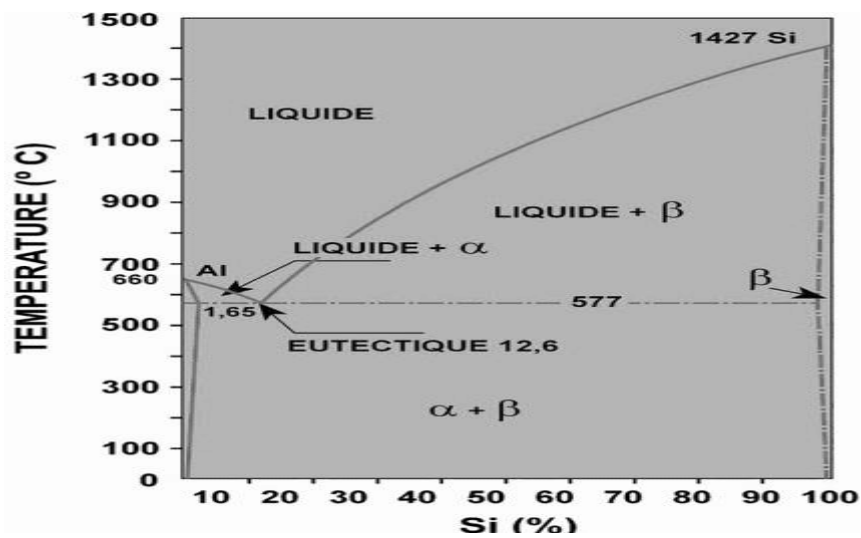


Figure 4.2 : représente le diagramme d'équilibre Al Si

4.2 Après l'anodisation :

On observe au microscope optique l'épaisseur de la couche d'oxyde sur les quatre échantillons

Echantillon 1 :

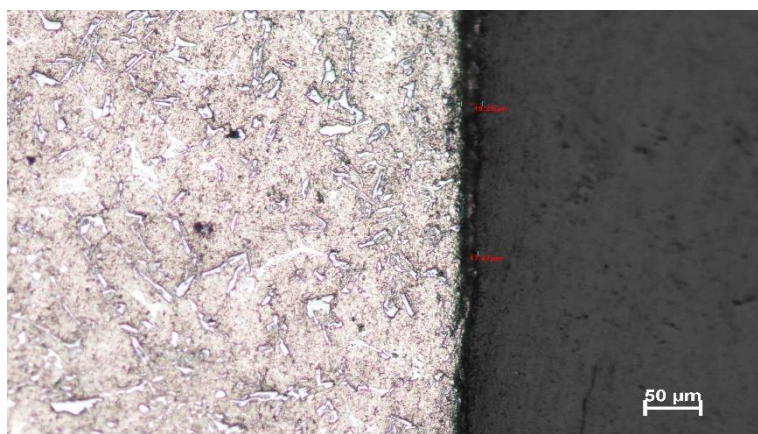


Figure 4.3 : Cathode Pb, Tension 24V

Echantillon 2

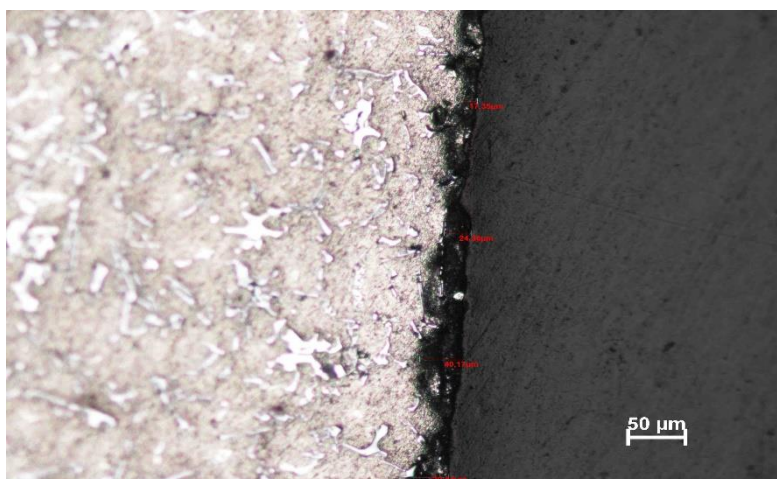


Figure 4.4 : Cathode Inox, Tension 12 V

Echantillon 3

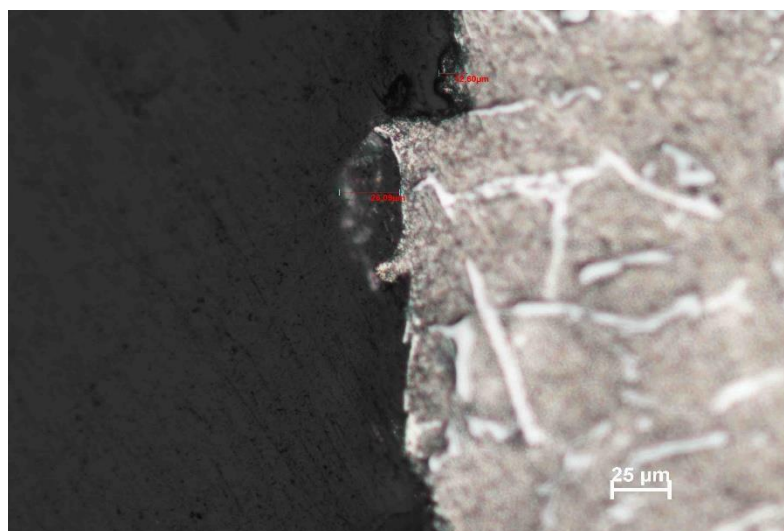


Figure 4.5 : Cathode Pb, Tension 12 V

Echantillon 4 :

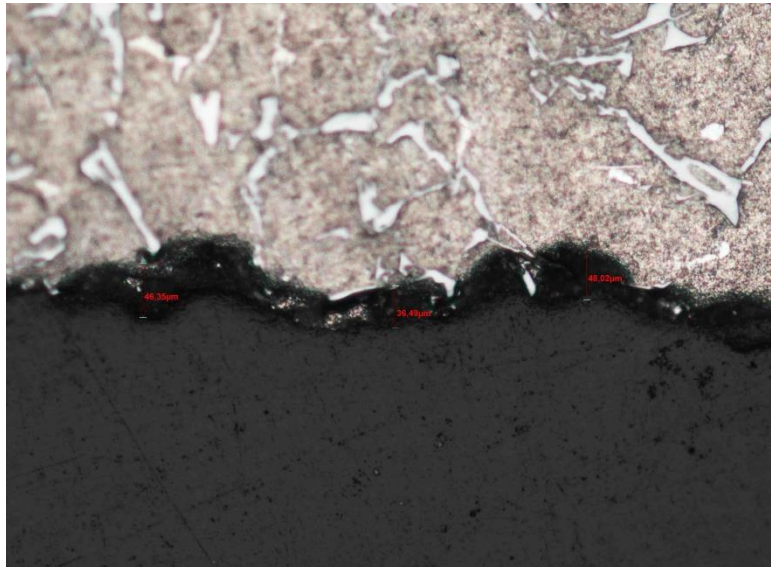


Figure 4.6 : Cathode Al, Tension 12 V

Après l'opération d'anodisation, on note la formation de la couche d'oxyde sur tous les échantillons avec une épaisseur de la couche d'oxyde qui varie d'un échantillon à l'autre et une épaisseur maximale qui dépasse les 35µm pour l'échantillon avec une cathode en aluminium. **(Fig 4.6)**

L'échantillon anodisé avec une cathode en inox affiche la 2eme meilleure épaisseur de couche d'oxyde. Suivi avec les échantillons **1 et 3** (cathodes en Pb) avec une plus faible épaisseur pour l'échantillon à **12V**.

Cette variation est parfaitement corrélée à la conductivité électrique des matériaux de la cathode, et pour les deux pièces anodisées avec des cathodes en plomb, l'augmentation de la tension a permis d'augmenter la couche d'oxyde.

4.3 Conductivité électrique :

Aluminium : $35,5 \times 10^6$ S/m,

Plomb : $1,25 \times 10^6$ S/m

INOX 430 : $4,8 \times 10^6$ S/m

Un Test a été fait pour le même alliage, mais sans l'opération de désoxydation à l'acide nitrique, et sur cet échantillon, la couche d'oxyde ne s'est pas formée. Ce qui est dû au non passage du courant électrique à cause de la couche d'oxyde déjà présente.

Conclusion générale

Le présent travail a permis d'explorer de manière expérimentale le procédé d'anodisation sulfurique appliqué à un alliage d'aluminium de fonderie de type Al-Si-Cu. À travers une série d'essais contrôlés, nous avons analysé l'influence de **la tension d'anodisation** et de **la nature de la cathode** sur la formation de la couche d'oxyde anodique.

Les résultats obtenus ont mis en évidence une **corrélation claire entre la conductivité électrique du matériau de la cathode, la tension appliquée et l'épaisseur de la couche formée**. Les cathodes en aluminium, présentant une conductivité élevée, ont permis de former des couches plus épaisses, tandis que les cathodes en plomb ou en inox ont donné des résultats moins performants. De plus, l'augmentation de la tension a favorisé la croissance de la couche d'oxyde, conformément aux principes électrochimiques du procédé.

L'étude a également souligné l'importance cruciale de la **préparation de surface**, notamment la désoxydation à l'acide nitrique. L'absence de cette étape a empêché le passage du courant et donc la formation de la couche anodique, illustrant le rôle déterminant de l'état initial de la surface.

Ces résultats confirment que l'optimisation des paramètres opératoires, alliée à une préparation rigoureuse de la surface, permet d'améliorer l'efficacité et la qualité de l'anodisation. Ce travail ouvre ainsi des perspectives intéressantes pour le contrôle des revêtements anodiques dans des applications industrielles, notamment dans les domaines aéronautiques, automobile et architectural.

Les référence :

- 1. L'aluminium, Techniques de l'ingénieur, Techniques du bâtiment, 2019, TBA 1066.**
- 2. J. Lanthony, Aluminium et alliages légers, Ed. Presses universitaires de France,**
- 3. George E. Tot ten, D. S. M. (2006). "Handbook of aluminium volume 2 Alloy Production and materials manufacturing."**
- 4. Davis, J. R. (Ed.). Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International, 1993.**
- 5. Davis, J.R., Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1999**
- 6. Schweitzer, P. A. Corrosion Resistance of Aluminum and Magnesium Alloys, CRC Press, 2010.**
- 7. Matula, R.A., 1979, Electrical Resistivity Handbook, J. Phys. Chem. Ref. Data.**
- 8. Campbell, J. (2015). Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design. Butterworth-Heinemann.**
- 9. Polmear, I. J. (2005). Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals. Elsevier.**
- 10. G. E. Totten & D. S. MacKenzie. (2003). Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes. CRC Press.**
- 11. ASM Handbook, Vol. 15: Casting (2008). ASM International.**
- 12. M. Jolly (2020). Metal Casting: A Sand Casting Manual for the Small Foundry. Cambridge University Press.**
- 13. Jorstad, J. L. (2002). Effects of Solidification Parameters on Microstructure and Mechanical**
- 14. Mondolfo, L. F. (1976). Aluminum Alloys: Structure and Properties. Butterworths.**
- 15. Hatch, J. E. (1984). Aluminum: Properties and Physical Metallurgy. ASM International**
- 16. Kaufman, J.G. (2004). Aluminium Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications. ASM International.**
- 17. Davis, J.R. (1993). Aluminum and Aluminum Alloys. ASM Handbook, Vol. 2.**
- 18. Samuel, F.H., Samuel, A.M., & Doty, H.W. (1998). "Observations on the formation of Fe-intermetallics in Al-Si alloys." Journal of Materials Science, 33(5), 1205–1215.**
- 19. "Modification Rating System for Structure of Hypoeutectic Aluminum Silicon Casting Alloys," KBI Aluminum Master Alloys product literature, Cabot Corporation.**
- 20. Apelian, D., Shivkumar, S., & Sigworth, G.K. (1991). "Fundamentals of solidification processing of aluminum castings alloys." AFS Transactions, 99, 727–742.**

21. Hatch, J.E. (1984). Aluminum: Properties and Physical Metallurgy. ASM International.21

Ch2

22. Madelung, O. (2004). Non-Equilibrium Thermodynamics of Surface Treatment Processes, Springer, Chapter 7 – Thermochemical Surface Treatment of Aluminum, pp. 192–211.

23. Vargel, C. (2004). Corrosion of Aluminium, Elsevier, Chapter 8 – Conversion Coatings, pp. 311–332.

24. Damm, C., & Witte, M. (2011). "Powder Coatings for Aluminium Components", European Coatings Journal, 3, 54–59.

25. Mallory, G. O., & Hajdu, J. B. (1990). Electroless Plating: Fundamentals and Applications, AESF

26. Ohring, M. (2001). Materials Science of Thin Films. Academic Press.26

27. Bahl, C. R. H., et al. (2002). "Protective coatings by PVD and CVD on aluminium alloys." Surface and Coatings Technology, 150(2), 150–157

28. Hinton, B. R. W. (2001). "Corrosion inhibitors for aluminum alloys", Corrosion, 57(5), 408–423.

29. Anodisation de l'aluminium : principes et applications. Revue Matériaux et Techniques.

30. Laribi, L. (2000). Préparation de surface avant anodisation des alliages d'aluminium. Mémoire de Magistère, Université d'Alger.

31. Catonne, J.-C., Chaussé, A., & Savall, A. (2002). Électrochimie industrielle : procédés électrolytiques et électrochimiques. Paris : Lavoisier Tec & Doc.

32. Thompson, G. E. (1997). Porous anodic alumina : fabrication, characterization and applications. Thin Solid Films, 297(1–2), 192–201.

33. Aurélie PERNOT – GEHIN ; Etude des procédés de colmatage d'alliages d'aluminium anodisé Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université de Henri Poincaré Nancy-I(2007).

34. Jean Sylvestre SAFRANY ; M1630 Anodisation de l'aluminium et de ses alliages (technique de l'ingénieur)2012

35. Matta, F., Abdel Ghany, A. M., & Shash, A. Y. (2018). Effect of alloying elements on anodizing behavior of Al–Si casting alloys, Journal of Materials Engineering and Performance, 27(10), 5407–5417.

36. CeiAl – Centre d'expertise sur l'aluminium. (2020). L'anodisation de l'aluminium. AluQuébec.

37. CeiAl – Centre d'expertise sur l'aluminium. (2020). L'anodisation de l'aluminium. AluQuébec.

