

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



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Ingénierie des matériaux et des surfaces

ANODISATION DE L'ALLIAGE D'ALUMINIUM
2017A (AU4G)

Proposé et encadré par :

Mme : BOUDINA-HAMEDI- N

Réalisé par :

MOSTEFAOUI ELHACENE

LAYOUNE CHEMSEDDINE

Année universitaire 2019/2020

*La vie n'est facile pour aucun de nous.
Mais quoi, il faut avoir de la persévérance,
et surtout de la confiance en soi.
Il faut croire que l'on est doué pour quelque
chose, et que, cette chose,
il faut l'atteindre coûte que coûte.*

Marie curie

Remerciements

**NOUS TENONS À REMERCIER LE DIEU LE TOUT
PUISSANT DE NOUS AVOIR DONNÉ LA VOLONTÉ
ET DE COURAGE POUR RÉALISER CE MODESTE
TRAVAIL**

**NOUS VOULONS PARTICULIÈREMENT
REMERCIER NOTRE PROMOTRICE MME :
BOUDINA HAMED I.N (MAÎTRE ASSISTANT A À
L'UNIVERSITÉ SAAD DAHLEB BLIDA 1) POUR
AVOIR CRU EN NOS CAPACITÉS ET SA PATIENCE
ET GÉNÉROSITÉ DURANT LA PRÉPARATION DE
CE TRAVAIL. LES CONSEILS QU'ELLE NOUS A
PROCURÉS TOUT AU LONG DE LA RÉDACTION,
ONT TOUJOURS ÉTÉ CLAIRS ET ENRICHISSANTS
NOUS PERMETTANT LA FINALISATION DE CE
TRAVAIL.**

**NOS REMERCIEMENTS S'ADRESSENT AUX
MEMBRES DE JURYS (DR. HADDAD. A ; DR.
CHIKER. N) QUI NOUS ONT FAIT L'HONNEUR DE
JUGER CE MODESTE TRAVAIL.**

**UN GRAND MERCI À TOUS NOS ENSEIGNANTS
QUI NOUS ONT MOTIVÉES. NOUS ADRESSONS
NOS REMERCIEMENTS À TOUS CEUX QUI ONT
PARTICIPÉ DE PRÈS OU DE LOIN À NOTRE
FORMATION ET À NOTRE ENCADREMENT.**

ملخص

هذا العمل تم إنجازه من أجل الوصول الى تحسين خصائص سبائك الألومنيوم ضد التآكل الميكانيكي عن طريق عمليات معالجة السطوح عموما و عملية الأنودة بصفة خاصة . سبائك الألومنيوم 2017A هي الأنسب لصنع مجموعة طويلة من الأجزاء في الصناعة، الأنودة، هي معالجة السطح التي تتكون من العمليات الكهروكيميائية للتسبب في أكسدة الألومنيوم. يمكن إجراء هذا العلاج في ظل ظروف محددة للغاية من أجل تحقيق الهدف النهائي، وهو الحصول على طبقة مؤكسدة ذات خصائص جيدة قادرة على مقاومة الظواهر الميكانيكية كالتآكل والاجهاد.

كلمات مفتاحية: ألومنيوم، انودة، معالجة السطوح، التآكل الميكانيكي، معالجة كيميائية، الاجهاد، أكسدة

Résumé :

Cette travail est réalisé pour avoir un aperçu sur l'amélioration des propriétés des alliages d'aluminium, contre l'usure mécanique par un traitement du surface appelé l'anodisation. L'alliage d'aluminium 2017A est le plus approprié pour réaliser une longue gamme de pièce dans l'industrie, L'anodisation, est un traitement de surface superficiel qui consiste par des opérations électrochimiques à provoquer l'oxydation de l'aluminium. Ce traitement peut être réalisé selon des conditions opératoires bien particulières afin d'atteindre l'objectif final qui est l'obtention d'une couche anodisée avec des bonnes propriétés.

mots clés : aluminium , anodisation , traitements de surface ,traitement chimique , usure, fatigue , oxydation

Abstract:

This work is being done to gain insight into improving the properties of aluminum alloys against mechanical wear by a surface treatment called anodization. The 2017A aluminum alloy is the most suitable for making a long range of parts in industry, Anodizing, is a surface treatment which consists of electrochemical operations to cause the oxidation of aluminum. This treatment can be carried out under very specific operating conditions in order to achieve the final objective, which is to obtain an anodized layer with good properties.

Key words: aluminium, anodization, surface treatment, chemical treatment, mechanical wear, fatigue, oxidation

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface	2
I. L'aluminium et ces alliages	3
A. Renforcement des alliages d'aluminium	4
II. Alliage d'aluminium (2017A)	6
a. Propriétés et utilisation du 2017A « Duralumin » :	6
b. Composition chimique d'alliage d'AL 2017 A	6
c. Propriétés mécanique d'alliage d'aluminium de type 2017 A	6
d. Propriétés et données numériques du 2017A	8
III. Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages	10
Chapitre II : les traitements des surfaces et l'anodisation contre l'usure	13
I. Les traitements de surface	14
a. Nettoyage des surfaces	14
b. Traitements mécaniques	14
c. Revêtements métalliques	16
d. Traitements optiques	18
e. Traitements de conversion	19
f. Traitements thermochimiques de diffusion	19
g. Traitements par transformation structurale	20
h. Traitements organiques et organo-minéraux	20
i. Autres	21
II. Prétraitements surfacique et Anodisation	21
A. Prétraitement électrolytique ou chimique	21
B. Prétraitement mécanique des surfaces	23
C. Les traitements d'oxydation anodique (anodisation)	24
III. L'usure	31
1. généralité sur l'usure	31
2 -Type d'usure connue :	32

Liste des figures :

Figure 1. Répartition de la consommation d'aluminium	12
Figure 2 : <i>Anodisation de l'aluminium</i>	25
Figure 3 : a) Réponse en tension pour une anodisation de type barrière sous densité de courant constante	26
Figure 4 : a) Réponse en tension ou en densité de courant pour une anodisation de type poreux	28
Figure 5: Schéma de la couche anodique	29
Figure 6: <i>Mécanisme de colmatage à l'eau bouillante d'une couche anodique</i>	31
Figure 7 : Mécanisme d'usure abrasive à deux corps, d'usure abrasive à trois corps et d'usure adhésive	33

Liste des tableaux :

Tableau 1: Principaux éléments d'alliages en fonction de la série et domaine de composition massique	4
Tableau 2: composition chimique d'alliage d'aluminium 2017A	6
Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques typiques	7
Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques typiques	8

Introduction général

Depuis les débuts de 20^{ème} siècle, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'aluminium afin d'améliorer la résistance de ces alliages sachant que ces derniers sont soumis à des changements variables qui provoquent les différents phénomènes microscopiques.

Les propriétés des alliages d'aluminium peuvent être classés selon leur utilisation. Dans le domaine aéronautique, les propriétés mécaniques telle que les modules et les limites d'élasticité, l'écroutissage, la résistance à la fatigue ...etc. Sont les plus importants. Dans d'autre domaine par exemple en électronique les propriétés les plus recherchées sont les propriétés physiques.

L'objectif de ce travail est de faire une étude sur les propriétés des alliages d'aluminium les plus couramment utilisés contre l'usure mécanique comme le 2017A, et de mettre en évidence l'impact de l'anodisation sur les propriétés de ces alliages

Ce travail est scindé sur plusieurs paragraphes principalement sur des recherches bibliographiques sur l'aluminium et ses alliages, ses classifications, leur domaine d'application, leur propriétés mécanique, physico-chimique...etc. et plus particulièrement sur les traitements de surface en général et l'anodisation en particulier.

On a, aussi, développé la recherche sur l'alliage d'aluminium de type 2017A plus particulièrement sur ces propriétés et son domaine d'application.

L'anodisation aujourd'hui est considérée comme un traitement des surfaces le plus courant pour ces avantages : économique, écologique, et le résultat qui assure l'amélioration des propriétés, en particulier la possibilité de la coloration qui accompagne l'opération.

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

I.1 L'aluminium et ces alliages

L'aluminium est naturellement présent dans la croûte terrestre, mais n'existe pas sous sa forme métallique. L'aluminium métallique est obtenu par réduction de l'alumine, qui est l'un des constituants principaux de la bauxite, contenant également de l'oxyde de fer et de la silice. L'alumine est un oxyde très stable, ce qui rend sa réduction difficile. La découverte de l'aluminium est attribuée à **Humphrey Davy**, qui en obtint pour la première fois en 1809, par électrolyse de sels fondus d'aluminium. Le premier à produire de l'aluminium suffisamment pur pour pouvoir déterminer certaines de ses propriétés fut Wöhler en 1827. L'aluminium présente de nombreux avantages qui en font un matériau de choix pour une variété d'applications. Les principaux atouts de l'aluminium sont sa légèreté, sa conductivité thermique, sa conductivité électrique, sa tenue à la corrosion, son aptitude aux traitements de surface ainsi que sa facilité de mise en œuvre. De plus, la variété d'alliages d'aluminium et de traitements thermiques permet la fabrication de matériaux correspondant précisément aux attentes de chaque domaine d'application (matériaux de constructions, transports, câbles, emballage...). La production mondiale d'aluminium en 2011 a atteint 43,5 millions de tonnes, faisant de l'aluminium l'alliage métallique le plus utilisé dans le monde après l'acier¹.

Classification des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium sont classés selon un nombre composé de 4 chiffres. Le premier chiffre indique la série de l'alliage propre à l'élément d'addition majoritaire (Tableau 1).

Il est à noter que la nomenclature adoptée pour la famille 1XXX (aluminium seul) diffère de celle des alliages et a pour principal but de renseigner sur la pureté de l'aluminium. Dans les familles 2 à 8, le 2ème chiffre de la nomenclature est réservé aux modifications successives de la composition chimique de l'alliage permettant d'améliorer certaines propriétés. Par exemple, la composition de l'alliage 2024 a été enregistrée en 1954, l'alliage modifié 2124 breveté en 1970, l'alliage 2224 en 1978 et ainsi de suite, chaque modification restant dans les limites permises par la norme. Enfin, les deux derniers chiffres permettent d'identifier l'alliage au sein de la série

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

Série d'alliages	Éléments d'alliages principaux	Domaine de composition (% massique)
1XXX	-----	Al > 99%
2XXX	Cuivre	2-6
3XXX	Manganèse	0.5-1.5
4XXX	Silicium	0.8-1.7
5XXX	Magnésium	0.5-5
6XXX	Magnésium + Silicium	Mg : 0.2-1.5 Si : 0.2-1.5
7XXX	Zinc + Magnésium	Zn : 5-7 Mg : 1-2
8XXX	Silicium + Fer	Si ; 0.3-1 Fe : 0.6-2

Tableau 1: Principaux éléments d'alliages en fonction de la série et domaine de composition massique ²

A. Renforcement des alliages d'aluminium

a. Durcissement structural :

Le durcissement structural a une importance primordiale dans la métallurgie des alliages d'aluminium car c'est le processus par excellence qui permet d'obtenir des niveaux élevés de résistance mécanique. Trois phases sont nécessaires :

- Mise en solution : maintien en température suffisamment élevée afin de mettre en solution solide les éléments d'addition
- Trempe : refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à température ambiante la solution solide

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

a. - Maturation - revenu: après trempe, l'alliage durcit plus ou moins rapidement suivant sa composition par simple séjour à la température ambiante: c'est la maturation ou vieillissement naturel³

b. -par écrouissage

L'écrouissage de l'aluminium ou d'un alliage d'aluminium a pour effet d'augmenter sa dureté et sa résistance mécanique (limite élastique et charge de rupture), avec en contrepartie une diminution de sa plasticité (allongement à la rupture, aptitude à la déformation). Le taux d'écrouissage est défini par :

$$[(E-e) / e].100$$

Avec : (E) épaisseur initiale ; (e) épaisseur après écrouissage²

Influence de l'écrouissage sur les caractéristiques mécaniques⁴: les propriétés mécaniques (par exemple : résistance à la traction, ductilité, ténacité, résistance au fluage, vitesse de propagation de fissure en fatigue etc.) dépendent fortement de la composition de l'alliage, de la microstructure finale, des modes de déformation dans chacune des phases et des transferts de glissement possible entre ces deux phases , Le terme d'écrouissage est également utilisé pour désigner une opération de transformation des propriétés mécaniques du matériau: celui-ci est sollicité et une fois la limite d'élasticité dépassée, il subsistera toujours une déformation rémanente dite déformation plastique. Les effets conférés sont d'une part une augmentation de la limite d'élasticité (par rapport au matériau initial) et de la dureté d'autre part , les propriétés mécaniques peuvent évoluer vers une augmentation de la résistance jusqu'à le point de rupture.

c. -par l'ajout des éléments d'addition

L'aluminium non allié ayant des propriétés très réduites, il est possible d'améliorer ses propriétés en ajoutant des éléments qui modifient plus ou moins profondément la microstructure.

Les atomes des éléments d'addition peuvent :

- **Être en solution solide de substitution** : ils prennent la place des atomes d'aluminium dans le réseau. Leur taille est plus petite ou plus grande que l'atome d'aluminium ce qui perturbe le réseau qui devient plus difficile à déformer.

- **former des précipités hors solution solide** : cohérents, semi-cohérents, ou incohérents avec la matrice d'aluminium. L'effet provoqué est le même sur la difficulté de déformation du réseau.

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

Le durcissement de l'aluminium sera ainsi d'autant plus conséquent que le nombre et l'importance de ces perturbations seront plus grands : la nature, la teneur, la répartition de ces éléments d'addition sont primordiales à cet égard.

Les éléments d'addition sont peu nombreux : cuivre, silicium, magnésium, manganèse, titane et des associations magnésium + silicium, zinc + magnésium, zinc + magnésium + cuivre. ³

II. Alliage d'aluminium (2017A)

a. Propriétés et utilisation du 2017A « Duralumin » :

Le 2017A est l'alliage le plus approprié pour réaliser une large gamme de pièces dans L'industrie, l'aviation militaire comme exemple. En effet, il est léger et Résistant au même temps, ce qui le rend le plus courant. Réputé par le nom AU4G, le duralumin peut être considéré comme étant à l'origine du développement de l'aluminium dans l'aviation et également du développement de l'aviation elle-même. Cependant, il y a lieu de rappeler que sa résistance à la corrosion en atmosphère corrosive est relativement faible dans le cas de séjours prolongés.⁵

b. Composition chimique d'alliage d'AL 2017 A

2017 A (AU4G)

Correspondances:

Europe EN 573	France AFNOR	Allemagne DIN	Grande bretagne BS	Italie		USA ASTM	Japon JIS
2017 A (AlCu4MgSi)	2017 A	AlCuMg1	2017 A	3579	9002/2	2017 A	A 2017

Densité : 2,8

Composition chimique nominale % :

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,20 à 0,80	max 0,7	3,5 à 4,5	0,40 à 1,0	0,40 à 1,0	0,1	0,25	-	Solde

Tableau 2: composition chimique d'alliage d'aluminium 2017A ⁵

c. Propriétés mécanique d'alliage d'aluminium de type 2017 A

La production d'aluminium représente un taux réduit de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position pour l'utilisation des matériaux métalliques, mais occupent le premier rang dans les

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

matériaux non ferreux. L'aluminium doit cette place par un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. Les caractéristiques les plus importantes permettant la variété d'application des alliages d'aluminium sont : la légèreté, la ténacité, la mise en forme, la conductibilité électrique et thermique, le magnétisme, la résistance à la corrosion.

A-Tôles EN AW-2017 A (Etat standard T4 / T451) :

Tôles EN AW-2017 A (Etat standard T4 / T451):

Etat	Epaisseur spécifiée (mm)		Rm (MPa)		Rp0,2 (MPa)		A % mini		Rayon de pliage		Dureté HBS
	Supérieur à	jusqu'à	mini	maxi	mini	maxi	A 50	A	180°	90°	
O	>0,4	1,5		225		145	12			0 e	55
	1,5	3,0		225		145	14			1,0 e	55
	3,0	6,0		225		145	13		0,5 e	1,5 e	55
	6,0	9,0		225		145	13		1,0 e	2,5 e	55
	9,0	12,5		225		145	13			4,0 e	55
	12,5	25,0		225		145		12			55

T4	> 0,4	1,5	390		245			14	3,0 e	3,0 e	110
T 451	1,5	6,0	390		245			15	5,0 e	5,0 e	110
	6,0	12,5	390		260			13		8,0 e	111
T451	12,5	40,0	390		250			12			110
	40,0	100,0	385		240			10			108
	100,0	120,0	370		240			8			105
	120,0	150,0	350		240			4			101
T42	>0,4	3,0	390		235		14				109
	3,0	12,5	390		235		15				109
	12,5	25,0	390		235			12			109

Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques typiques ⁶

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

B -Barres filées, Barres étirées :

En fonction de leur application les barres d'alliages d'aluminium est mise en forme suivent des normes spécieuses ils ont arrivé avec des tailles et formes respectent les normalisations mondiales.

Barres filées :

Etat	Dimensions mm		Rm (MPa)		Rp0,2 (MPa)		A % mini	A50 % mini
	Diam	Plat	mini	max	mini	max		
O/H111	< 200	<200		250		135	12	10
T4	<25	<25	380		260		12	10
T4510	25 à 75	25 à 75	400		270		10	
T4511	75 à 50	75 à 150	390		260		9	
	150 à 200	150 à 200	370		240		8	
	200 à 250	200 à 250	360		220		7	

Barres étirées:

Etat	Dimensions mm		Rm (MPa)		Rp0,2 (MPa)		A % mini	A50 % mini
	Diam	Plat	mini	max	mini	max		
O/H111	< 80	<80		240		125	12	10
T3	<80	<80	400		250		10	8
T351	<80	<80	400		250		8	6

Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques typiques⁶

d. Propriétés et données numériques du 2017A ⁷

Nous donnons ci-dessous quelques propriétés essentielles de cet alliage :

- **Masse volumique** : Elle varie en fonction de la présence ou non d'éléments d'addition. Elle est de 2700 kg/m³ pour un aluminium de pureté 99,65% et de 2790 kg/m³ pour le 2017A.
- **Module d'élasticité** : Le module d'élasticité est de 66,6 GPa pour l'aluminium pur et augmente en présence d'impuretés et des éléments d'addition. Dans le cas de l'AU4G, ce module est compris entre 69 et 72 GPa et son module de cisaillement est compris entre 23 et 26 GPa.
- **Propriétés thermiques** : La température de fusion est de 660,4°C pour un aluminium pur. Elle varie entre 560°C et 640°C pour le 2017A.
- **Propriétés électriques** : L'aluminium pur conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs avec une résistivité électrique

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

de $2.92 \cdot 10^{-8} \Omega.m$. Les éléments d'addition ont une influence importante sur sa conductivité électrique. Pour le 2017A, la résistivité électrique est multipliée quasiment par deux ($5.1 \cdot 10^{-8} \Omega.m$) ce qui diminue considérablement sa conductivité électrique.

- La chaleur c'est l'agitation thermique. La transmission peut se faire par des électrons qui transmettent leur excès d'énergie cinétique un peu plus loin car ils sont plus libres de leurs déplacements. Faute d'électrons, la conduction se fait par transmission entre atomes de proche en proche. Cette transmission est d'autant plus efficace que le réseau est rigide. C'est la raison pour laquelle les diamants de synthèse conduisent bien la chaleur. La **loi de Wiedemann-Franz**⁸ est une relation entre la conductivité électrique et la conductivité thermique d'un métal suivant l'équation :

$$K/U = L.T$$

K : conductivité thermique ($w.m^{-1}k^{-1}$)

U : conductivité électrique ($s.m^{-1}$)

L : constante = $2.44 \cdot 10^{-8}$

➤ **Ténacité** : La ténacité ou résistance statique résiduelle à la propagation d'une fissure est une notion très importante pour les alliages travaillant en chargement cyclique car elle conditionne la fiabilité et la sécurité de toute la structure. Cette Propriété est caractérisée par le critère K_{Ic} lequel se situe entre 21 et 23 pour le 2017A, Sachant que le K_{Ic} est un facteur concerner la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure, il s'oppose à la fragilité.

➤ **Résistance à la fatigue** : La fatigue est un processus qui, sous l'action de contraintes ou déformations cycliques, répétées ou alternées, modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. Les étapes principales de la fatigue sont : 1-Amorçage de fissures,2- Propagation des fissures (Elle suit d'abord approximativement le plan de scission maximale. La vitesse de propagation est alors très faible. Les défauts ne sont décelables qu'au laboratoire, Puis elle suit le plan perpendiculaire à la contrainte de tension maximale. La vitesse de propagation s'accélère. Pendant cette période, les contrôles décèlent la fissure), 3-La rupture finale. On détermine la limite d'endurance comme étant le rapport entre la limite à la fatigue à 10^8 en contraintes alternées (traction-compression) et la charge de rupture en traction monotone. Ce

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

rapport varie entre 0,25 et 0,35 dans le cas des alliages de la série 2000. Ce rapport sert à caractériser l'endurance en fatigue.

-La ténacité joue un rôle principal à la résistance à la fatigue, tant que la ténacité est important la capacité des matériaux pour résister à la fatigue augment.

III. Les domaines d'applications de l'aluminium et ses alliages

Les caractéristiques physiques et chimiques de l'aluminium expliquent ses succès industriel et commercial. En effet, l'aluminium avec sa résistance aux sollicitations mécaniques et sa légèreté, (presque trois fois plus léger que l'acier), son aptitude à l'amélioration de ses caractéristiques par traitement thermique ou à froid, sa résistance à la corrosion, sa bonne tenue, justifient ses utilisations dans les bâtiments, l'équipement des territoires ou la construction navale.

La variété des alliages d'aluminium en nombre, famille et composition a élargi ses champs d'utilisation, comme la conductivité électrique de l'aluminium (de l'ordre de deux tiers de celle du cuivre) ; l'aluminium est utilisé comme un conducteur électrique plutôt que le cuivre, pour but d'avoir une économie de 50% sur le poids. La conductivité thermique de l'aluminium est presque de 60% de celle du cuivre, ce qu'est remarquable et intéressant et permet l'utilisation pour les ustensiles de cuisine, les capteurs solaires, les éléments frigorifiques, les disques de frein etc. L'utilisation de l'aluminium est aussi importante dans l'électronique, dans le dessalement de l'eau de mer ; dans tous ces domaines, il est question d'échanges thermiques. L'aluminium est un très bon réflecteur de la chaleur, de la lumière et des ondes électromagnétiques.

Dans les alliages d'aluminium avec le fer, celui-ci n'a pratiquement plus aucun effet magnétique. L'aluminium est facile à la mise en forme suivant la plupart des méthodes, cette qualité est exploitée lors du filage des profilés en aluminium et du laminage de bandes et de feuilles. L'aluminium peut être soudé ou collé. Son aptitude aux traitements de surface de tous genres permet la réalisation de solutions esthétiques. L'aluminium permet un grand choix de demi-produits selon les applications à réaliser. Il existe environ 80 alliages couramment utilisés. L'aluminium est indéfiniment recyclable. Sa réintroduction dans le circuit n'utilise que 5 % des quantités d'énergie nécessaires à la production d'aluminium de première fusion. En usine, les chutes de production sont recyclées à 100 %. Le taux de recyclage des produits en aluminium en fin de vie est de 85 % dans le bâtiment, 80 % dans le transport, 70 % dans les applications mécaniques et électriques, et 65 % dans l'électroménager.

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

L'ensemble de ces atouts, l'aluminium est considéré aujourd'hui comme le métal le plus utilisé après le fer. L'ensemble des diverses propriétés de l'aluminium explique la vaste gamme d'applications économiques de ce produit.

L'aluminium est très utilisé dans le transport. Aussi dans l'aéronautique et l'aérospatiale, grâce à l'aluminium et à ses alliages, le poids de la structure d'un avion a été divisé par deux.

La prépondérance de l'aluminium dans l'aéronautique n'a pu être conservée que par une évolution considérable au fil des ans des alliages utilisés. Aujourd'hui encore l'aluminium représente près de 80 % de la masse à vide des avions civils modernes (Airbus, Boeing...).

Les pièces de moteurs peuvent être réalisées par l'aluminium en automobile, il a un emploi dans les éléments de châssis, de carrosserie et d'équipements. L'allègement des véhicules automobiles par l'utilisation de l'aluminium permet d'économiser de carburant pour les utilisateurs.

Après la seconde guerre mondiale, utilisation de l'aluminium dans la fabrication des fenêtres puis des façades a débouché sur la naissance d'une nouvelle architecture de murs rideaux, symbole de l'architecture moderne. Aujourd'hui, il se rencontre partout dans le bâtiment : toitures, bardages, panneaux d'isolation, fenêtres, portes, volets, vérandas, pare-soleil, cloisons, faux plafonds, cabines de douche.

Le secteur de l'emballage apprécie les multiples propriétés de l'aluminium, en particulier ses propriétés de barrières aux liquides, aux gaz et à la lumière. L'emballage constitue un débouché important pour l'aluminium.

L'aluminium sert à la fabrication de câbles de transport et de distribution d'énergie : lignes haute tension, câbles souterrains, fils de bobinage pour transformateurs... L'excellente conductivité de l'aluminium, mais aussi sa légèreté et sa solidité expliquent son développement dans ce domaine.

L'aluminium est présent dans l'équipement des maisons (ustensiles de cuisine, appareils électroménagers, réfrigérateurs, radiateurs), le revêtement des disques compacts laser, le mobilier urbain, la signalisation routière.

Les spécificités physico-chimiques de l'aluminium en font donc un métal très demandé par les industriels et les ménages pour beaucoup d'objets de la vie quotidienne⁹. (Figure 1).

Chapitre I : alliages d'aluminium et les traitements de surface

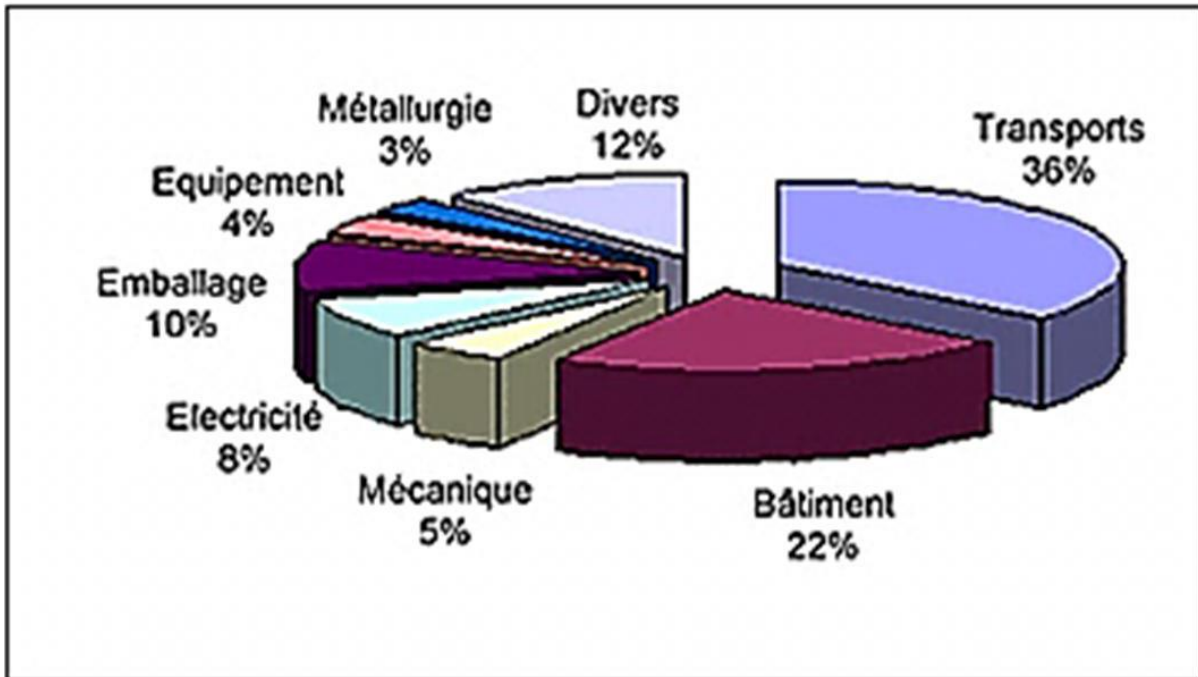


Figure 1. Répartition de la consommation d'aluminium⁷

I. Les traitements de surface ^{10 11}

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

a. Nettoyage des surfaces

Avant tout traitement, le nettoyage des surfaces est une phase essentielle qui a pour objet d'enlever les souillures existant à la surface des pièces et qui comprend deux opérations distinctes :

- le dégraissage qui élimine les corps gras : par des actions mécaniques, chimiques, électrolytiques.
- le décapage qui enlève toute trace de corrosion et d'oxyde qui adhèrent à la surface des pièces et qui peuvent être éliminés par une *action mécanique* (sablage ou grenailage), *chimique* ou *électrolytique*.

Ces opérations sont toujours suivies d'un *rinçage*.

b. Traitements mécaniques :

Pour améliorer les propriétés de surface, il existe un nombre important de procédés de fabrication comme les traitements mécaniques qui sont des procédés permettent d'améliorer les performances des matériaux par une action combinée de durcissement superficiel, de modification structurale comme :

• Aéro gommage et hydro gommage :

Le gommage est un procédé de nettoyage par micro-abrasion, obtenue par la projection en basse pression (de 0,5 à 5 bars), à travers une buse de sablage adaptée au support traité, des éléments suivants :

- L'air qui véhicule le granulat jusqu'à la buse de projection. Son débit (litres/mn ou m³/heure) et sa pression de sortie (bars) vont influencer sur le rendement et l'état de surface.
- Un granulat (Aéro gommage) aussi neutre et écologique que possible dont la dureté et la granulométrie devront être adaptées au support à traiter et à l'état de surface recherché.
- L'eau (hydro gommage) qui sera pulvérisée pour diminuer poussières et projections. Son action adoucit aussi l'effet abrasif du granulat.

L'action combinée de ces trois éléments avec un réglage adapté de la pression de travail permet de nettoyer la plupart des surfaces encrassées en limitant l'abrasion au strict nécessaire.

- **Ébavurage** : est un procédé d'enlèvement de copeaux destiné à éliminer les bavures détachables et adhérentes, ainsi qu'à arrondir les bords sur les pièces prêtes au montage.

Chapitre II : les traitements des surfaces et l'anodisation contre l'usure

L'ébavurage traditionnel à l'aide de brosses est ici combiné avec un procédé par fraisage ou à haute précision. Aujourd'hui des machines avec des mécanismes spéciaux pour que le procédé soit facile à appliquer

- **Galetage** : est une opération de lissage sans enlèvement de matière et de compactage des surfaces métalliques dans le corps du roulement qui consiste en une déformation plastique des couches périphériques du composant. Il existe 3 types de galetage ; un Galetage de renforcement qui permet d'augmenter la résistance à la fatigue des pièces de construction soumises à des contraintes élevées, un Galetage dimensionnel ou de forme dont le but est de modifier la forme initiale de la pièce soit pour la ramener dans la tolérance soit pour introduire des corrections volontaires destinées à un usage particulier. Le troisième type appelé Galetage de surface ou super finition est réalisée sur des surfaces cylindriques, sur des sphères ou galetage de filets pour améliorer les flancs.

- **Grenailage** : Le grenailage de précontrainte contrôlé ou « shoot peening », est une technique sensible, basée sur la transformation structurelle des matériaux. Le procédé consiste à mettre des pièces mécaniques sous compression superficielle, par la projection de billes d'acier. Cette opération de microbillage qui permet de créer une zone comprimée, est appliquée soit sur toute la surface soit localement. Afin de résoudre un problème de grenailage, on tient compte de la nature du matériau à traiter, du diamètre de la grenaille, du type de grenailleuse et de la vitesse de projection.

- **Sablage** : est une technique industrielle de nettoyage des grandes surfaces en utilisant un abrasif (Les abrasifs ou médias abrasifs sont des ingrédients de la tribo-finition. Ils sont souvent à base céramique ou polyester. Leur forme est très variable et comprend principalement des cylindres coupe droite ou en biais, des triangles coupe droite ou en biais, des billes, des cônes, des pyramides.) projeté à grande vitesse à l'aide d'air comprimé au travers d'une buse, sur le matériau à décaper.

Le sablage comme le grenailage sont des techniques de décapage par projection d'abrasifs. Quand l'abrasif est constitué de billes, on parle plutôt de grenailage.

- **Microbillage** : est un procédé de traitement de surface par impact. Il consiste à projeter des microbilles sur une surface, dans le but de la décaper sans l'abîmer.

On utilise le microbillage pour le nettoyage, le décapage de pièces mécaniques de toutes matières, ou pour réaliser une finition esthétique sur l'inox ou les métaux non ferreux comme l'aluminium.

- **Polissage** : est essentiellement une opération de finition, qui a pour but de diminuer la rugosité et diminuer la topologie de surface en éliminant les défauts superficiels mis en évidence par l'opération de décapage

c. Revêtements métalliques :

+ Dépôt par voie humide :

- électrolytique ou électrodéposition :

Repose essentiellement sur une polarisation anodique de la pièce à traiter et donc on ionise sauf la surface superficielle de la pièce sans toucher le substrat : cette méthode n'est pas évidente et il est fort probable d'attaquer le métal de base à cause d'une mauvaise maîtrise des conditions opératoires. Malgré l'existence de plusieurs formules d'électrolytes, toutes ces formules sont basées sur des solutions acides ou bases généralement concentrées afin de ne pas toucher le méta de base.

- chimique statique, dynamique :

Le traitement chimique se pratique par une simple immersion de la pièce à traiter dans une solution bien déterminée et il met en œuvre des réactions d'oxydoréductions. Les outils principaux, qui sont capables d'atteindre les résultats recherchés, sont : la thermodynamique, cinétique électrochimique et en particulier les diagrammes tension-pH

+ Dépôt par voie sèche :

• 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.

• dépôt physique PVD :

Les dépôts PVD utilisent tous les techniques possibles permettant la limitation de la taille de la pièce à traiter et l'augmentation du coût du traitement ce qui nous permet d'avoir une qualité du dépôt la meilleure.

• **dépôt chimique CVD :**

Afin de provoquer une réaction chimique on amène l'halogénure comme étant un composé volatil au voisinage de la surface à recouvrir et donc cette réaction chimique conduit au dépôt d'un produit solide qui réalisé soit en enceinte semi-étanche soit sous flux gazeux. De nombreux matériaux peuvent être déposés sur des substrats divers, avec une très bonne adhérence et une épaisseur importante. Les applications dans les domaines de l'usure, du frottement et de l'oxydation sont classiques.

• **Faisceaux énergétiques :**

Ces faisceaux sont essentiellement des faisceaux laser, bombardement électronique et implantation ionique nous donnent possibilités d'application prometteuses quoi qu'ils soient récemment découverts.

• **Application de feuilles métalliques :**

- **Dorure** : L'or étant un métal très ductile, il est possible par martelage d'obtenir des feuilles très minces (quelques micromètres) et plastiques sans casser le fil du métal. Une feuille d'or est mise à plat sur un support puis attrapée à l'aide d'un pinceau large appelé « palette », sur lequel elle s'accroche en raison de l'électricité statique. La feuille d'or est alors déposée sur la surface à dorer.
- **Argenture** : les pièces sont immergées dans un bain électrolytique de sels d'argent à faible intensité de courant électrique. L'anode est une plaque d'argent pur et la cathode est constituée par les pièces à argenter. Sous l'effet du courant électrique, les atomes d'argent, en dissolution dans le bain, se déposent sur les pièces à traiter (cathode). Ce phénomène physicochimique demande un entretien constant du bain et de sa teneur en sel d'argent.
- **cuvrage à la Feuille** : Le cuivrage est une opération de revêtement par du cuivre, de la surface de pièces devant être protégées de l'oxydation ou devant recevoir un cuivrage préalable à un traitement incompatible avec la matière de la pièce, La couche de cuivre déposée sur une surface a plusieurs usages en fonction des besoins, de la matière et des conditions électrochimiques pour but de protection contre l'oxydation, préparation de surface avant autres traitements recouvrement esthétique, recouvrement fonctionnel.

• Dépôt par voie thermique

- **Étamage** : L'étamage est une opération de traitement de surface qui consiste à appliquer une couche d'étain sur une pièce métallique.
- **Par immersion en métal fondu** : Cette méthode concerne uniquement les métaux ayant une température de fusion faible. Lors de la diffusion on constate qu'on se trouve dans le cas d'un revêtement de structure complexe, avec formation de divers composés.
- **Hexa-plasma** : La source thermique est un arc électrique éclatant entre une cathode et une anode dans un plasma gazeux donnant naissance à un flux gazeux à une très haute température généralement supérieure à 15000°C étranglé dans une tuyère et l'échappement se fait à une vitesse très grande. C'est à l'intérieur de ce jet de plasma à haute énergie que l'on injecte le matériau d'apport sous forme de poudre véhiculée par un gaz porteur. Les particules sont fondues et transportées par ce jet de gaz sur le substrat.
- **Flamme-plating** : est un procédé de projection thermique qui permet d'obtenir, en surface, pour n'importe quel métal, les propriétés du carbure de tungstène massif grâce à une projection à vitesse supersonique de particules sur la surface à revêtir. La force de projection est obtenue par une explosion ; le carbure de tungstène n'est pas le seul revêtement applicable par ce procédé, des mélanges de carbures, des oxydes peuvent aussi être utilisés.

d. Traitements optiques : Les traitements optiques de surfaces constituent à l'évidence un élément clé de la performance des systèmes optiques dans lesquels ils interviennent.

– ils savent d'une part rendre efficaces des composants aussi élémentaires que des lentilles ou des miroirs, en modifiant le comportement des surfaces optiques quantifié : c'est le cas des traitements antireflets, sans lesquels la transmission d'un objectif complexe, notamment infrarouge, ne dépasserait pas quelques pourcents, ou encore celui des traitements réfléchissants, qui permettent d'exalter la luminosité d'un dispositif catoptrique

– ils sont également capables de remplir des fonctions système de plus en plus élaborées, allant de la sélection d'une bande étroite de longueurs d'onde à la réjection d'un large spectre, en passant .

e. Traitements de conversion :

- Électrolytique :

Anodisation : est un traitement de surface de type conversion qui permet de protéger ou de décorer les matériaux non ferreux tels que l'aluminium (ou alliage), du titane (ou alliage) par oxydation anodique

Sulfuration : L'oxydation anodique sulfurique O.A.S est une oxydation volontaire de la couche superficielle de l'aluminium (ou de ses alliages). Elle se réalise en milieu sulfurique et forme une mince couche d'oxyde d'aluminium, appelée l'alumine. Cette couche d'alumine peut être colorée à la demande du secteur industriel concerné

- Chimique :

Phosphatation : La phosphatation consiste à décaper la surface d'un acier à l'aide d'une solution diluée et chaude d'acide phosphorique. Cela provoque la formation d'une pellicule d'environ 1 micron de phosphate de fer. Cette pellicule assure la résistance à la corrosion de la pièce.

Chromatation : est un procédé de conversion chimique de l'aluminium et de ses alliages, destiné à former à la surface du métal un revêtement à base de chromate de chrome, apportant une très bonne protection anticorrosion.

f. Traitements thermochimiques de diffusion

• Diffusion d'éléments non métalliques :

La carbonitruration : est un procédé de traitement thermochimique des aciers. Elle permet d'augmenter la teneur en carbone de la surface à traiter, elle entraîne une augmentation de dureté après la trempe.

La boruration : est un traitement thermochimique dont le but, semblable à ceux de la cémentation et de la nitruration, est de procurer aux pièces métalliques des duretés superficielles très élevées

La cémentation : est un procédé de métallurgie servant à durcir les aciers par ajout superficiel de carbone.

• Diffusion d'éléments métalliques :

L'aluminisation : est le dépôt d'aluminium à la surface de pièces pour les protéger des éléments oxydants ou pour leur donner certaines propriétés.

Chromisation : La chromisation est une technique thermochimique permettant de réaliser des couches par diffusion de chrome à travers la surface d'objets métalliques Elle donne d'excellentes propriétés mécaniques et d'anticorrosion au métal de base.

g. Traitements par transformation structurale

• **Voie thermique :**

1-fusion superficielle : La fusion superficielle est un moyen d'améliorer les propriétés de surface des métaux et alliages, avec ou sans apport d'autres éléments.

2- trempe superficielles : La trempe superficielle est un procédé qui n'affecte que la surface de la pièce pour lui apporter une grande dureté tout en conservant un bon allongement et une grande résilience au cœur.

3-recuit : Le recuit d'une pièce métallique est un procédé correspondant à un cycle de chauffage puis refroidissement permettant de modifier les caractéristiques d'un métal. Le recuit est également utilisé pour changer les propriétés magnétiques d'une pièce.

4- Revenu : Le revenu est un traitement thermique effectué sur les pièces métalliques afin de leur donner leurs caractéristiques mécaniques et parfois de résistance à la corrosion d'usage. Ce traitement est effectué après la trempe.

5- L'hexa-plasma : ou protection plasma est un traitement thermique superficiel, à l'aide d'une torche à plasma de pièces en contact et soumises à des réactions de frottement, de roulement ou de corrosion.

• **Voie mécanique :**

1-grenaillage ; 2- galetage : (traité dans la page 15)

h. Traitements organiques et organo-minéraux

• **application d'un revêtement de Peinture (matière) par enduction :**

La peinture désigne à la fois une composition généralement liquide employée pour protéger ou décorer la surface d'un objet en le couvrant d'une pellicule opaque ou colorée.

• **par thermo laquage :** consiste à appliquer une peinture en poudre par pulvérisation électrostatique, ensuite polymérisée dans un four de cuisson. Le processus de thermo laquage est principalement réalisé en trois phases :

- Un traitement de surface chimique, comprenant une conversion avec ou sans chrome hexa valent, pour garantir une bonne adhérence de la peinture sur l'aluminium et des performances anticorrosion.
- Un poudrage électrostatique pour appliquer la poudre sur la pièce.
- Une polymérisation dans un four pour obtenir les caractéristiques mécaniques et d'aspect de la teinte.

• **par électrophorèse ou cataphorèse** : La cataphorèse est une technique de peinture qui consiste à immerger la pièce dans un bain de peinture hydrosoluble, en mettant la pièce en cathode (d'où le nom de cataphorèse) et en faisant migrer les particules de peintures en suspension dans le bain au moyen d'un courant électrique d'une certaine tension, de l'anode vers la cathode. Les particules de peinture se déposent alors uniformément et sur pratiquement toute la surface de la pièce immergée. La pièce (ou le bain) est légèrement agitée pendant l'opération qui ne dure que quelques minutes.

i. Autres

• **Sulfinitisation** : est un traitement de surface utilisé pour résoudre certains problèmes ardues de frottement et d'usure, en particulier à chaud. Il provoque l'enrichissement en carbone, en azote et en soufre de la surface des pièces traitées.

• **Zingage** : est un terme général désignant tout traitement de surface entraînant la formation d'un revêtement métallique de zinc. L'objectif est d'empêcher la dégradation du métal recouvert par corrosion. En effet, le zinc est un métal très réducteur qui est donc oxydé à la place du métal qu'il protège.

II. Prétraitements surfacique et Anodisation

A. Prétraitement électrolytique ou chimique :

1. Polissage électrolytique :

Cette opération peut s'intégrer dans une gamme de traitement en complément d'un décapage et a pour but de donner de très bonnes qualités de brillance et d'adhérence aux traitements suivants, Le polissage électrolytique des alliages d'aluminium peut être réalisé en bains acides ou alcalins La polarisation anodique permet une accumulation

importante d'alumine hydratée sur la surface métallique favorisant la formation d'une couche visqueuse ¹²

Normalement un enlèvement d'une fine couche en surface d'un matériau métallique est réalisé par ce processus de dissolution anodique est effectué par l'ensemble de réactions électrochimiques dans un milieu concentré en acide. Le principe consiste à immerger dans une solution (l'électrolyte) deux électrodes métalliques entre lesquelles un courant électrique est appliqué, des surfaces de géométrie complexe peuvent être traitées, ainsi que des matériaux durs. L'électro polissage enlève les inclusions métalliques et permet de former une nouvelle couche mince d'oxyde, homogène et uniforme, riche en oxyde de chrome.¹³

2. Dégraissage/décapage chimique :

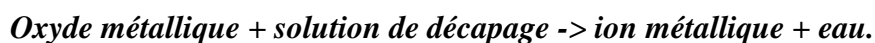
Le dégraissage/décapage a pour principal intérêt de retirer les contaminations de surface (graisses et autres dépôts) et les oxydes résiduels afin de se rapprocher en surface de la concentration à cœur du métal .Ces traitements, de nature chimique ou électrochimique, peuvent être répertoriés en plusieurs classes différentes ¹⁴ :

- les traitements à base de solvants organiques,
 - les traitements alcalins
 - les traitements acides à chaud,
 - le polissage chimique ou électrochimique.
- Parmi les solvants organiques les plus utilisés, nous pouvons citer l'ortho-dichlorobenzène et le trichloréthylène.

Les dégraissage/décapage alcalins (pH entre 9 et 11) sont aujourd'hui largement répandus dans l'industrie de l'aluminium en raison du faible coût de mise en œuvre. Il est d'usage de distinguer deux classes de traitements alcalins :

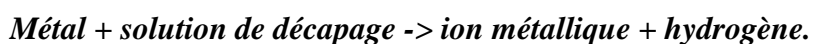
-Les traitements alcalins non décapants contiennent des silicates en faibles quantités ou certains tensioactifs ou surfactants afin d'inhiber la dissolution de l'aluminium métal.

- Les traitements alcalins avec action décapante contiennent généralement de la soude caustique afin d'enlever une quantité significative de métal suivant la réaction :



Le dégagement d'hydrogène peut d'une certaine manière contribuer par effet mécanique au décrochage des souillures superficielles ¹⁵

il est formé par la réaction suivante



3. Satinage/blanchiment :

Les oxydes d'aluminium et les défauts métallurgiques superficiels sont éliminés par cette opération, soit avec des réactions électrochimiques où la surface du métal est attaquée par la soude. Ensuite, on retrouve en surface satinée des résidus des métaux constitutifs de métal substrat qui forment un dépôt, d'où la nécessité d'un traitement oxydant les métaux, dissolvant les oxydes et redonnant à la pièce une apparence blanche métallique. Généralement pour le blanchiment de surface de matériau, on utilise l'acide nitrique, l'acide sulfo-chromique et l'acide sulfurique avec des additifs oxydants.¹⁶

4. Rinçage :

L'opération est faite généralement fait pour que la pièce soit propre, Les rinçages est parmi les étapes importantes du traitement de surface, ils peuvent constituer une source de contamination des pièces. La surface de la pièce doit être à l'issue des rinçages exempte de toute impureté. La qualité de l'eau est donc extrêmement importante car au séchage, elle s'évapore et peut laisser apparaître des traces blanches (sels comme le calcium)¹⁷

5. Séchage :

Un séchage parfait est indispensable afin d'éviter toute ré-contamination.

B. Prétraitement mécanique des surfaces

1. Satinage mécanique :

Le satinage ou, plus généralement, la matification de surface sont obtenus par des opérations de brossage ou par jet abrasif (microbilles de verre, etc.) Il est important de prendre en compte les matériaux utilisés lors de ces opérations si une anodisation est prévue en traitement de finition Exemple : le brossage par des matériaux métalliques différents de l'aluminium (cuivre, fer...), de par les risques de corrosion galvanique qu'ils sont susceptibles de provoquer, nécessite un décapage approprié avant oxydation anodique. D'autres traitements mécaniques à vocation décorative sont possibles sur les alliages d'aluminium (bouchonnage, chenillage...), mais ils doivent respecter les mêmes précautions¹⁸

2. Polissage :

Obtenu par des opérations de bufflage, de tamponnage et d'avivage (utilisant fréquemment des pâtes abrasives), il permet de diminuer la rugosité du métal et de

Chapitre II : les traitements des surfaces et l'anodisation contre l'usure

lui conférer un aspect brillant. Il convient cependant de rester prudent vis-à-vis de ces traitements lorsque l'on souhaite réaliser une finition de type anodisation :

- tous les alliages ne sont pas équivalents quant à leur aptitude au polissage mécanique (par exemple les alliages chargés en cuivre se polissent bien, mais se ternissent rapidement) ;
- certains défauts peuvent être masqués par le traitement mécanique, mais réapparaître au cours de la gamme d'anodisation
- la structure métallurgique peut être perturbée en surface (**couche de Beilby**), ce qui se révèle lors des traitements d'oxydation anodique¹⁹.

3. Projection abrasive :

cette procédé est fait par le jet du sable ou des grains abrasifs sur la surface, ces derniers doit être plus fins et plus doux. La technique peut être utilisée pour détendre la surface à traiter.

C. Les traitements d'oxydation anodique (anodisation)

1) Principe d'anodisation

Le principe de l'anodisation est celui de l'électrolyse de l'eau, la solution est rendue conductrice par addition d'un acide, l'aluminium est placé en anode, la cathode est le plomb. Lors du passage du courant, trois réactions se font : une partie de l'aluminium est oxydée et forme un oxyde, une partie de l'aluminium entre en solution et de l'oxygène se forme qui s'échappe sous forme de bulles de gaz. Tandis que la couche d'oxyde se forme, la résistance électrique de la couche augmente ce qui libère de la chaleur.²⁰

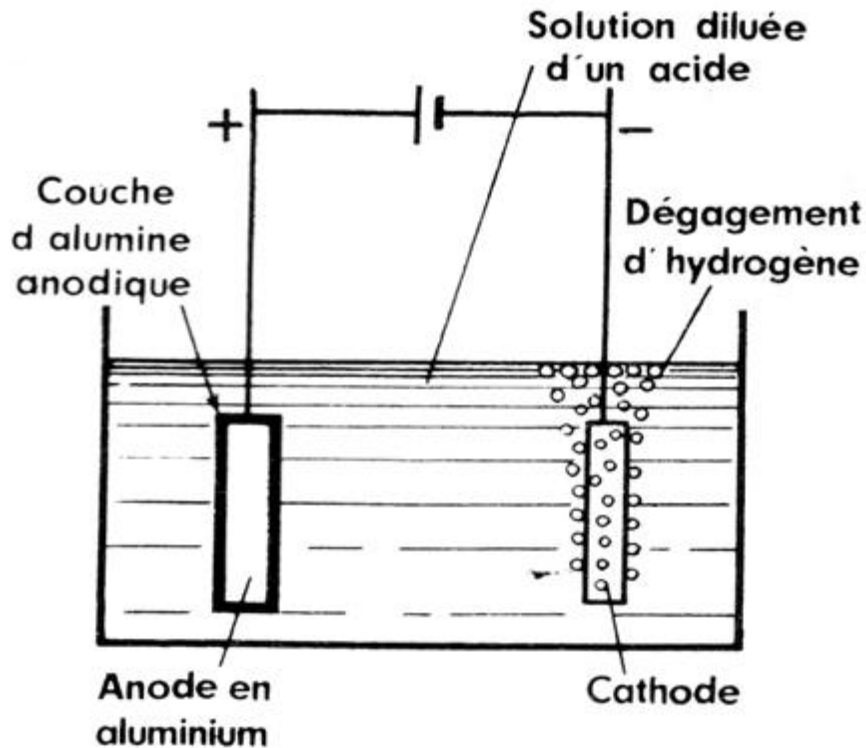
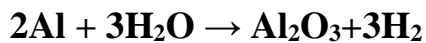


Figure 2 : Anodisation de l'aluminium

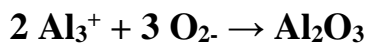
La réaction globale d'oxydation anodique de l'aluminium en milieu acide habituellement avancée est :



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

Selon la réaction : $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$

* A l'anode, plusieurs étapes sont proposées pour former l'oxyde d'aluminium ²¹:



L'alumine ainsi formée est peu conductrice.

2) Formes d'anodisation²²

On doit donc considérer 3 cas :

- L'électrolyte n'a pas d'action dissolvante sur l'alumine, c'est le cas des solutions d'acide borique, qui produisent une couche de type barrière.
- L'électrolyte a une action dissolvante moyenne, c'est le cas de l'acide sulfurique, la dissolution conduit à la formation de nombreuses piqûres dans la couche barrière permettant ainsi au courant de passer. La structure obtenue est poreuse et orientée.
- L'électrolyte a une action dissolvante élevée, l'alumine peut dans ce cas être dissoute à la même vitesse que celle à laquelle il se forme. L'épaisseur du film est alors très faible, cette action est utilisée pour l'obtention d'un polissage électrolytique.

a) Anodisation de type barrière

Ce procédé peut appliquer pour l'aluminium de pureté élevée. L'application industrielle principale de la couche barrière se trouve aujourd'hui dans la fabrication des condensateurs, Cependant, peut être également employée à des buts protecteurs. Le type d'électrolytes utilisés ne doit pas avoir une action dissolvante sur l'alumine. Les électrolytes les plus utilisés sont les tartrates d'ammonium, l'acide borique, les carbonates de sodium et les phosphates de sodium. Le caractère barrière de la couche formée tient du fait que celle-ci s'oppose rapidement au passage des électrons, d'où une chute rapide de l'intensité du courant est observée. (Figure 3)

La couche formée est compacte, exempte de porosités, relativement mince et renferme des anions issus de l'électrolyte.

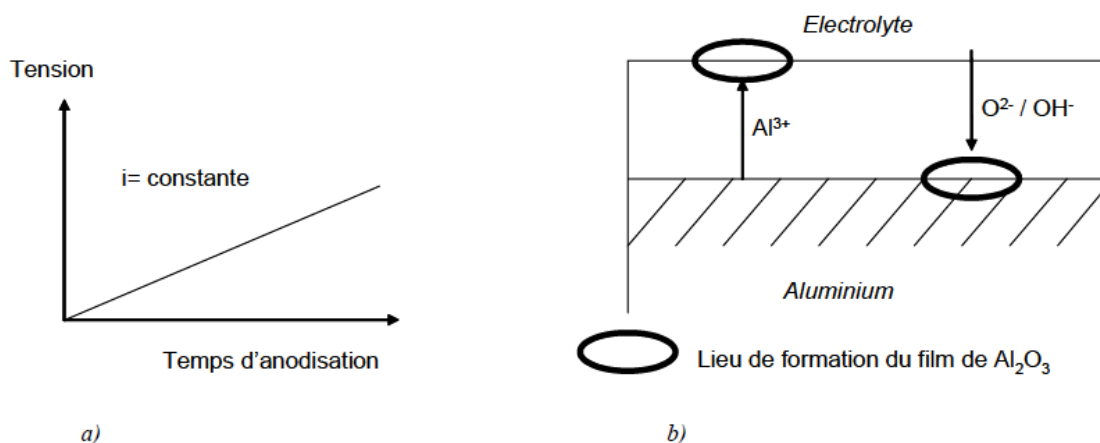


Figure 3 : a) Réponse en tension pour une anodisation de type barrière sous densité de courant constante

b) Représentation schématique de la croissance d'une couche anodique de type barrière²³

b) Anodisation de type poreux :

Dans le cas où l'électrolyte choisi possède une action dissolvante sur le métal ou sur son oxyde, le processus d'évolution de la couche anodique relève d'une compétition entre deux phénomènes :

L'élaboration de l'oxyde sous l'action du courant électrique ; La dissolution chimique de la couche.

La couche barrière prend naissance dès la mise sous tension et croît à partir du métal. L'alumine formée au début de traitement se trouve donc en surface. Cette couche d'alumine qui se forme aux dépens du métal aura tendance à empêcher le passage de courant du fait de son caractère isolant.

Elle est très fine de l'ordre de 1 nm et très compacte, non poreuse et c'est elle qui détermine en particulier la résistance à la corrosion du dépôt. Sa formation se traduit par un pic initial de courant.

Au moment où l'intensité du courant décroît, la dissolution chimique de l'oxyde commence en de nombreux points. Pendant que l'oxyde croît sous l'action du courant, des microporosités et irrégularités dues à la dissolution de la couche barrière évoluent vers une structure poreuse.

Au-dessus de la couche barrière, on remarque, donc, des cellules d'alumine qui se forme sous forme de prismes hexagonaux chacun suivant son axe principal (pores). Le nombre et le diamètre des pores dépendent de la nature, et de la concentration de l'électrolyte alors que, la dimension des cellules et l'épaisseur du film barrière ne dépendent principalement que de la tension de formation (figure 4).

Les propriétés de résistance à l'abrasion du film est déterminé par La couche poreuse, Dans cette couche le diamètre des pores est d'environ 15 nm et leur nombre de l'ordre de 10^9 par cm^2 .²⁴

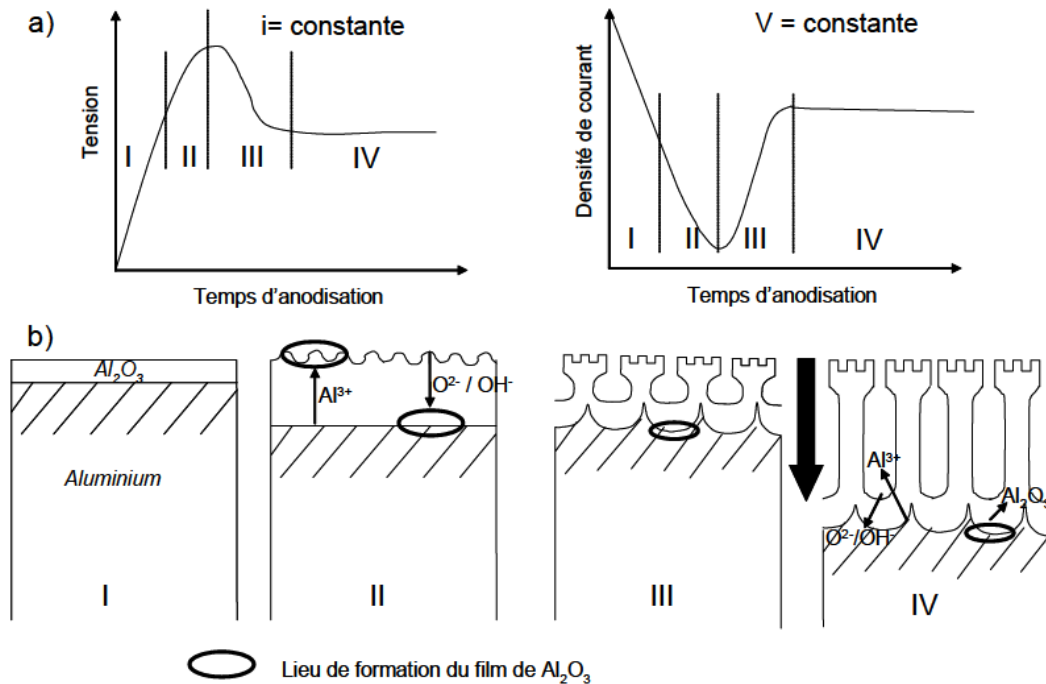


Figure 4 : a) Réponse en tension ou en densité de courant pour une anodisation de type poreux
 b) Représentation schématique de la croissance d'une couche anodique de type poreux.²⁴

- La couche d'alumine obtenue par anodisation est composée d'une partie barrière qui fait l'interface avec le métal et par laquelle transite le courant et d'une partie poreuse. Le procédé d'anodisation sulfurique est la plus utilisé dans ce type.

On a aussi :

- A- anodisation à l'acide chromique (OAC)
- B- anodisation borique-sulfurique (OASB)
- C- anodisation au milieu oxalique
- D- anodisation dure (OAD)

La couche d'oxyde anodique obtenue possède donc une structure duplex constituée d'une couche interne mince, dense et diélectrique appelée couche barrière, et d'une couche externe épaisse et poreuse dite en nid d'abeille (figure 5)

Structure de la couche anodisée

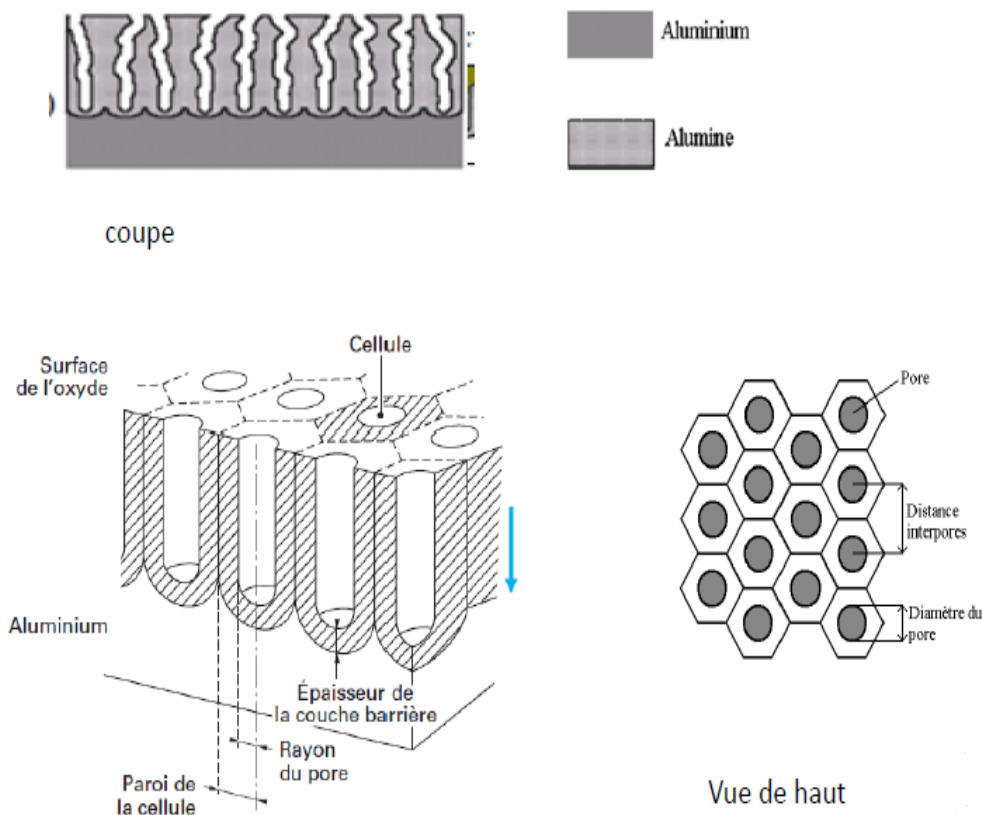


Figure 5: Schéma de la couche anodique²⁵

3) Les traitements postérieurs²⁶ :

Les alliages d'aluminium anodisé sont facile a mise en traitement postérieurs pour avoir une couche fine et aussi pour des demandes esthétiques , Les alliages de la série 2000 ne peuvent être colorés que par coloration chimique.

Restrictions aux alliages moulés / aux alliages avec % Si élevé (9%) ; il existe trois principales manières de colorer l'aluminium :

L'anodisation auto-colorée : les constituants de l'alliage se trouvent incorporés dans l'oxyde lors de sa formation, lui conférant une couleur plus au moins marquée selon le substrat .Les électrolytes utilisés sont constitués d'acides organiques, souvent en combinaison, avec éventuellement de l'acide sulfurique. Les densités de courant sont élevées. Industriellement, l'auto-coloration a cédé la place aux autres procédés de coloration.

La coloration chimique : la pièce anodisée est immergée dans une solution contenant des

colorants organiques ou minéraux. Le contrôle du bain est essentiel vis-à-vis de la reproductibilité de la teinte. Les colorants sont absorbés par capillarité. Ainsi la coloration chimique ne concerne que la partie supérieure de la couche d'oxyde, ce qui explique leur faible tenue à la lumière et aux intempéries.

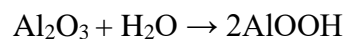
La coloration électrolytique : cette coloration consiste à déposer des particules métalliques dans les pores, produisant ainsi des teintes allant du champagne au bronze jusqu'au noir grâce au phénomène de diffraction de la lumière sur les particules métalliques déposées en fond de pores.

Cette coloration s'effectue par électrolyse alimentée en courant alternatif, en réduisant un ou plusieurs cations métalliques au niveau de la couche barrière.

4) Colmatage de la couche anodisée

Principe du colmatage : Les films anodiques formés sur l'aluminium sont, malgré leur épaisseur, très sensibles à l'atmosphère environnante du fait de leur forte porosité et sont ainsi sujets aux agressions extérieures qui entraînent une dégradation précoce. Afin d'augmenter la résistance à la corrosion de la couche anodique, il est important de modifier la porosité. Cette opération est appelée colmatage. Le mécanisme de colmatage généralement retenu est l'hydratation de l'oxyde d'aluminium formé au cours de l'anodisation. La modification de la couche généralement évoquée dans la littérature est la transformation de l'alumine anhydre formée lors de l'anodisation en alumine monohydrate (figure 6).

Cette opération s'accompagne d'un gonflement de la couche et par conséquent de la fermeture partielle des pores. La réaction de base du colmatage hygrothermique peut s'écrire de la façon suivante ²⁷:



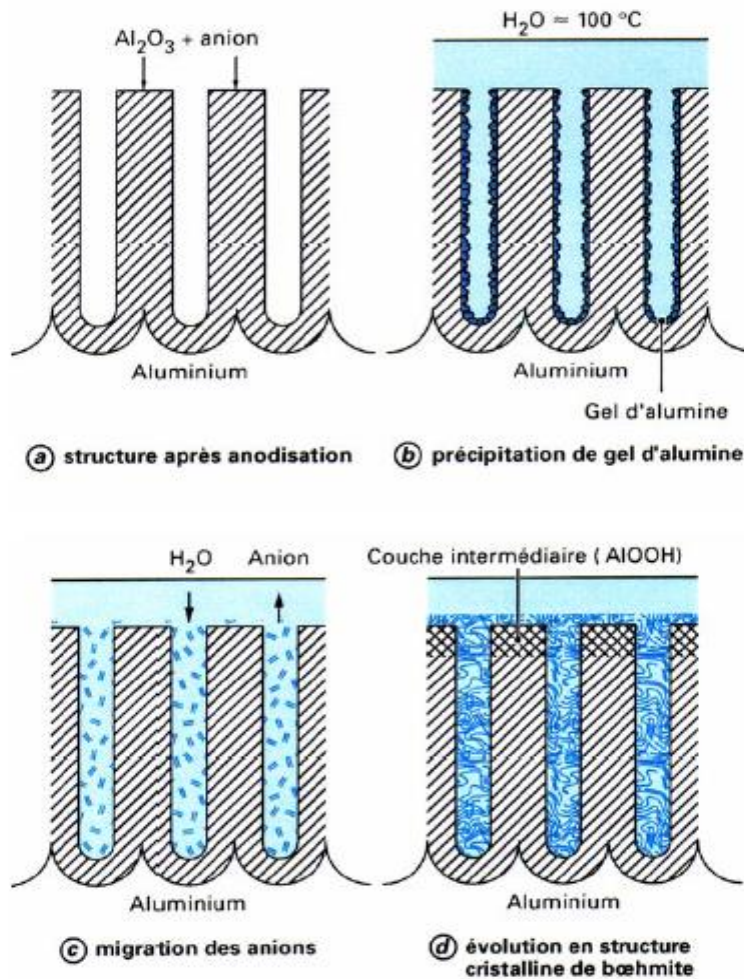


Figure 6: Mécanisme de colmatage à l'eau bouillante d'une couche anodique ²⁸

III. L'usure

1. généralité sur l'usure

L'usure d'un solide est généralement défini comme une perte de matière, un mouvement de matière ou une transformation de matière en surface du solide sous l'effet d'une interaction avec un autre milieu²⁹.

L'usure est un phénomène résultant de l'endommagement des surfaces en contact, Associé à un frottement souvent élevé. Le frottement est le phénomène qui s'oppose au mouvement d'une surface par rapport à une autre.

Le frottement se présente sous plusieurs aspects : ³⁰

- Mécanique : l'effort tangentiel en sens inverse du déplacement
- Géométrique : pertes des côtes

Chapitre II : les traitements des surfaces et l'anodisation contre l'usure

· Énergétique : perte de puissance qui se traduit par une diminution du rendement.

- En tribologie, la surface ne se limite pas uniquement à la notion d'aire d'appui des corps, mais concerne plus généralement les éléments de contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est à dire sur les contraintes mécaniques, les températures, le comportement du troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...). Ces éléments sont les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux en présence, les caractéristiques géométriques incluant, par extension, la forme des pièces³¹.

La surface d'un système tribologique (deux corps qui sont en contact) a les caractéristiques suivantes :

Le matériau lui - même n'est ni homogène, ni isotrope à l'échelle microscopique : les matériaux métalliques usuels sont poly-cristallins et parfois bi - ou polyphasés. Les impuretés, les joints de grains, les défauts cristallins, parfois des fissures où

Microfissures sont présentes à surface comme au du matériau. Toutes ces caractéristiques ont une incidence majeure aussi bien sur les propriétés mécaniques

que sur les propriétés chimiques des surfaces. À la surface d'un matériau, il faut considérer qu'il existe, avant l'application du frottement, sur une épaisseur variable de quelques micromètres ou dizaines de micromètres, une couche écrouie résultant de la mise en forme ou des sollicitations mécaniques subies en service dans le cas des composants de structure ou d'un système mécanique. La structure métallurgique et les propriétés mécaniques de la couche écrouie peuvent être très différentes des celles du matériau sous-jacent. En plus, la surface d'un matériau n'est jamais complètement inerte par rapport au milieu au contact où elle se trouve. Des réactions chimiques peuvent avoir lieu, par exemple pour les métaux, une oxydation conduisant à la formation d'une couche de composition chimique et des propriétés mécaniques très différentes des celles de la couche sous-jacente et dont l'épaisseur peut être très faible (couche de passivation des métaux : (5 - 50 nm) ou devenir très importante (couche de rouille sur les surfaces) suivant la nature du couple métal, environnement et de la température³²

-Type d'usure connue³³ :

Nous choisirons d'utiliser une classification inspirée de celle de Stachowiak³³. Elle distingue : l'usure due à l'action d'une particule sur la surface d'un solide (usure par abrasion, érosion ou cavitation), l'usure due au passage répété d'un solide sur une surface (usure par fatigue), et l'usure due aux forces d'attraction entre les atomes de

deux surfaces (usure adhésive). Viennent ensuite des modes d'usure plus spécifiques, comme l'usure corrosive ou l'usure par fretin.

Usure abrasifs :

L'usure abrasive est généralement engendrée soit par des particules préexistantes (matériaux granulaires), soit par des débris écrouis (ou protubérances) emprisonnés à l'interface du contact. On distingue ainsi suivant l'application, différents types de configuration, de sollicitation et de milieu. L'étude de ces différents paramètres et leurs influences est apparue intéressante pour comprendre et maîtriser l'usure abrasive³⁴.

Les surfaces endommagées par abrasion présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue.

La perte de matière dépend à la fois du matériau utilisé et de l'antagoniste, et l'aspect des fournit de précieuses indications.

Usure par adhésion :

Le mécanisme d'adhésion (voir Figure 7) est une usure par transfert de matière de surface sur l'autre pendant leur mouvement relatif, due à un processus de soudure en phase solide.

La matière d'une pièce est transférée sur l'autre pendant le mouvement, par soudage en phase solide. Les métaux, s'ils sont mutuellement solubles, forment des alliages par diffusion.

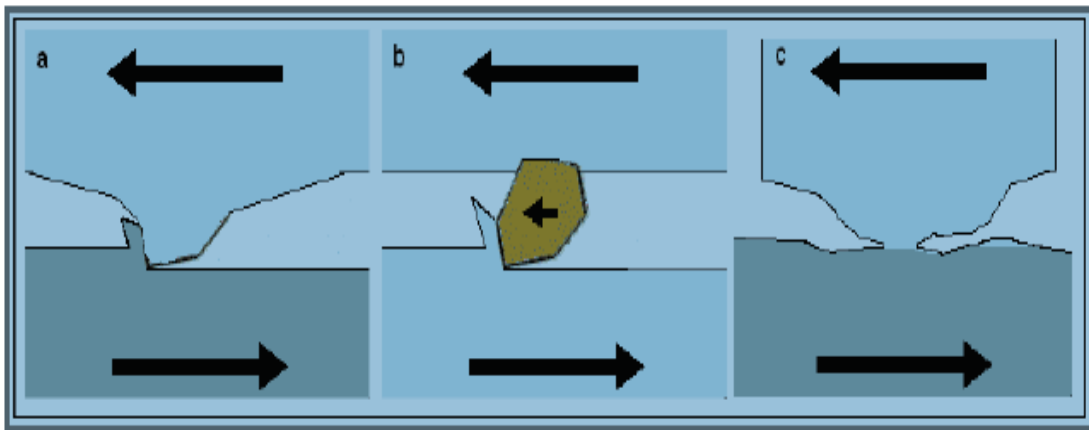


Figure 7 : Mécanisme d'usure abrasive à deux corps, d'usure abrasive à trois corps et d'usure adhésive³⁵

Sous l'effet d'un roulement pur, en raison de la localisation du point d'Hertz, on observe des fissures parallèles à la surface (contraintes de cisaillement maximales) ; en présence d'un glissement, on observe des fissures superficielles perpendiculaires à la surface.

Usure par corrosion ³⁶ :

Ce type d'usure intervient dans les situations où le contact fonctionne en environnement corrosif. L'énergie dissipée dans le contact peut alors activer les phénomènes de corrosion et accélérer la dégradation des surfaces. Ce phénomène sera détaillé par la suite. Il n'est pas évident de trouver une bonne illustration des faciès caractéristiques de ce phénomène, mais d'une manière générale, il faut chercher sur les faciès l'indice d'une activité de la corrosion.

En 1976, Eyre³⁶ a estimé les pourcentages pour les différents types d'usure dans l'industrie : l'usure par abrasion (+ usure par érosion) 58%, l'usure adhésive (+ usure par petits débattements) 23%, l'usure par fatigue de surface 14%, l'usure-corrosion 4%. Il semble que les usures d'origine adhésive ou abrasive soient les plus fréquentes. En pratique, il convient toutefois de noter ici que les faciès d'usure observés expérimentalement présentent souvent des caractéristiques mixtes et qu'il n'est pas toujours évident de définir quelle forme d'usure prédomine.

Usure par fatigue ³⁶ :

Il y a formation de fissures dans les matériaux en présence, sous l'effet de gradients de contraintes cycliques. Les fissures se propagent vers la surface et il y a détachement de « grosses » particules dont la taille peut atteindre le millimètre.

On parlera particulièrement d'égrènement lorsqu'il y a formation de trous correspondant à la microstructure initiale des matériaux. Il y a « déchaussement » au niveau des joints de grains d'un métal par exemple.

On parle d'élimination lorsque les déformations plastiques répétées des premiers corps conduisent à des fissures en sous-surface, parallèles à la surface. Il y a propagation des fissures le long du plan de cisaillement maximum.

Conclusion générale

L'objet de cette étude a été l'analyse et la compréhension de l'effet d'anodisation sur les alliages d'aluminium de type 2017A

A travers l'étude que nous avons menée, nous pouvons conclure ce qui suit :

- L'aluminium, sous sa forme pure ou alliage, est l'un des métaux les plus utiles sur la planète de par sa polyvalence, sa légèreté, son faible coût de production et son esthétique.
- L'étude des différents traitements de surface nous ont permis de comprendre l'impact de ces derniers sur l'amélioration des propriétés mécaniques des alliages d'aluminium 2017A.
- L'anodisation est une technique largement pratiquée dans l'industrie surtout dans l'aéronautique, l'automobile et le bâtiment. Cependant, le processus d'anodisation de l'aluminium requiert un certain nombre d'opérations préliminaires (dégraissage, décapage, satinage, polissage chimique ou électrochimique...) puis une étape complémentaire de colmatage.
- L'anodisation de l'Aluminium permet d'élaborer des films dont l'épaisseur et la structure sont très liées aux conditions expérimentales qui a un rôle prépondérant sur les propriétés mécaniques.
- Les propriétés d'alliage d'aluminium anodisés sont améliorées de manière importante cela permet d'avoir une bonne résistance contre l'usure et allonge la durée de vie de matériaux.

Conclusion générale

Références

-
- ¹ THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE
Conversion chimique des surfaces d'alliages d'aluminium sans chrome hexavalent.
Page 3 et 4 ; 15 Décembre 2016
- ² THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE
Conversion chimique des surfaces d'alliages d'aluminium sans chrome hexavalent.
Page 4 ; 15 Décembre 2016
- ³ Develay1990b: R. Develay, «Aluminium et alliages d'aluminium corroyés : propriétés métalliques», Techniques de l'Ingénieur, fiche M438, 1990.
- ⁴ Denquin A., Naka S., Acta Metall., 44 (1996), pp. 343.
- ⁵ Develay1990a: R. Develay, «Propriétés de l'aluminium et des alliages d'aluminium corroyés», Techniques de l'Ingénieur, fiche M440, 1990.
- ⁶ Akinlabi, Esther Titilayo. Thèse de Doctorat. Characterisation of Dissimilar Friction Stir Welds Between 5754 Aluminum alloy and C11000 Copper. Nelson Mandela Metropolitan University Port Elizabeth, South Africa. (2010).
- ⁷ Anderson1967: W.A. Anderson, in: K.R. Van Horn (Ed.), «Aluminium, Properties, Physical Metallurgy, and Phase Diagrams», ASM-Metals Park, OH,1 (1967) 79-108.
- ⁸ Alphonse Berget, . Relation entre les conductibilités électrique et thermique des métaux. J. Phys. Theor. Appl., 1890, 9 (1), pp.135-138.
- ⁹ Économie industrielle, Une perspective européenne, Pierre Médan et Thierry Warin, Dunod, 2000
- ¹⁰ SAID BENZAADA : TRAITEMENTS THERMIQUES, CLASSIFICATION ET DESIGNATION DES ACIERS ET FONTES (page5) année 2010
- ¹¹ Gérard BÉRANGER: Revêtements et traitements de surface. Approche technologique (pages 4, 5 et 6) année:2008
- ¹² M. Y. Sadallah , POLISSAGE DES ALLIAGES LEGERS ET DES METAUX PRECIEUX , ICERMA ,2013
- ¹³ D. Jenkinson, Stainless steel: The importance of being smooth and passive. Corros. Mater. 2002, 27, 10-13.. C.L. Faust, Electropolishing of stainless steel. Metal Finishing 1982, 80, 89-93.
- ¹⁴ J.M Kape, Pretreatment of aluminium by cleaning and etching, Product Finishing (London) 26 (8) (1973) 12-16

Références

- ¹⁵ J.S Safrany, Anodisation de l'aluminium et de ses alliages, Techniques de l'Ingénieur (2008)
- ¹⁶ J.C. Bara, Traitement de surface, Environnement et compétitivité, éd. Eyrolles (1988) 193p
- ¹⁷ Module de formaton APEV du 05 et 04 OCTOBRE 2012 Pierre jean MULLER
- ¹⁸ Anodisation de l'aluminium et de ses alliages , Pechiney Centre de Recherches de Voreppe Page 15
- ¹⁹ Anodisation de l'aluminium et de ses alliages Pechiney Centre de Recherches de Voreppe Page 14
- ²⁰ J. Lefebvre; "Traitements anodiques de l'aluminium et ses alliages"; Technique d'Ingénieur, MD3, P1630, 2000.
- ²¹ S. Kawai, *Anodizing and coloring of aluminum alloys*, ASM (2002)
- ²² [C. Brault; "Anodisation des métaux légers ou semi légers "; Ed CETIM, 1987.
- ²³ I. Franan, R.Dupree, Y. Jeong, G. E. Thomson, G. C. Wood & A. J. Forty; " Structural
- ²⁴ Ingénieurs Du Groupe Pechiney; "Mise en oeuvre et utilisation de l'aluminium et ses alliages"; Tome II, Ed Eyrolles, 1964.
- ²⁵ G.E. Thompson, *Porous anodic alumina: fabrication, characterization and applications*, Thin Solid Films 297 (1997), 192-201
- ²⁶ <https://www.a3ts.org/association-a3ts/> ,ECHT2020 European conference on heat treatment Dec 2 ,2020
- ²⁷ J.S. Safrany, Anodisation de l'aluminium et de ses alliages, Techniques de l'Ingénieur
- ²⁸ J.S. Safrany, *Anodisation de l'aluminium et de ses alliages*, Techniques de l'Ingénieur
- ²⁹ N, Brunetière, Introduction à laTRIBOLOGIE, Institut Pprime – Futuroscope 2016
- ³⁰ M. Cartier, P. Kapsa, Usure des contacts mécaniques - Problématique et définitions. Techniques de l'Ingénieur, 2001. BM5065: p. 1 - 10.
- ³¹ M. Cartier, P. Kapsa, Usure des contacts mécaniques - Eléments de tribologie. Techniques de l'Ingénieur, 2001. BM5066: p. 1 - 13.
- ³² M. Ridlova, Comportement en tribocorrosion des aciers inoxydables AISI 321 et DUPLEX 22-05 en environnements aqueux. Thèse de doctorat, 2003, Ecole Centrale Paris.

Références

³³ G.W. STACHOWIAK AND A.W. BATCHELOR. Engineering Tribology (Second Edition). Butterworth Heinemann, 2001.

³⁴ Salah MEZLINI, ETUDE DE L'USURE PAR ABRASION D'ALLIAGES D'ALUMINIUM, thèse de doctorat ,2003, L'ECOLE CENTRALE DE LYON

³⁵ Site Internet. <http://www.gordonengland.co.uk/wear>.

³⁶ P. J. Blau, Fifty years of research on the wear of metals. Tribology International, 1997. 30: p. 321 – 331