

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA

1 FACULTE DE

TECHNOLOGIE DEPARTEMENT MECANIQUE

IQUE



Pour l'obtention du diplôme de Master

OPTION : Génie des matériaux

Thème

***Effet de traitement thermique sur la microstructure
et les propriétés mécaniques des composites
2024/Cr₂AlC fabriqué par friction malaxage***

Promoteur:

Dr. BENAMOR Abdessabour

Réaliser Par :

HAZI Abderrezak

MOUSSA KEBIR alaa

2023/2024

Dédicace

Je dédie cet ouvrage

A mon père et ma mère qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes frères, mes grands-parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime

Abderrezak

Dédicace

A mes chers parents,

En témoignage de ma gratitude, si grande qu'elle puisse être, pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon bien être et le soutien qu'ils m'ont prodigué tout le long de mon éducation. Que dieu, le tout puissant, les préserve et les procure santé et longue vie.

À mes frères et ma sœur,

Pour leur encouragement et leur bonté qu'ils m'ont accordé, j'exprime ma profonde reconnaissance et mon grand respect.

À tous mes amis Qu'ils trouvent en ce travail, l'hommage de ma gratitude, qu'aucun mot ne saurait l'exprimer, pour leur attachement durant ces longues années.

À toute ma famille, mes amis et tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail, expression de mon grand amour avec tous mes vœux de bonheur et de prospérité.

Moussa

Remerciement

Avant tout, nous voudrions louer Allah le Tout-Puissant pour les bienfaits qu'il nous a accordés pendant nos études et pendant la réalisation de cette thèse.

Cette thèse est le fruit d'un long travail de recherche. En préambule, je tiens à adresser tous mes remerciements aux membres du jury Dr Abdessabour Benamor pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches en accepté d'examiner mes travaux et de les enrichir de leurs propositions. Je tiens à remercier le corps professoral et le personnel administratif de notre département (Département de génie mécanique), je tiens à exprimer ma profonde gratitude à notre promoteur Dr. ABDESSABOUR BENAMOUR pour son aide précieuse, son énergie positive et sa patience avec nous.

Je tiens à remercier tous les membres du Laboratoire d'études et de recherches en technologie industrielle (LERTI) pour leur aide et leur sympathie manifestées lors de ma présence au LERTI.

À tout être humain qui a ajouté un morceau à ma Connaissance.

Enfin, je voudrais adresser mes remerciements les plus sincères à tous ceux qui ont contribué directement ou de loin à la réalisation de ce travail.

Abstract

This work focuses on the study Surface compounds 2024 treated by introducing CR-2-ALC molecules as reinforcement by treatment, agitation and friction. The study will then consist of Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 2024/Cr2AlC composites manufactured by friction mixing Cr2AlC.

ملخص:

يركز هذا العمل على دراسة مركبات السطح لعام 2024 التي تمت معالجتها عن طريق إدخال جزيئات CR-2-ALC كتنعيم عن طريق العلاج والإثارة والاحتكاك. ستركز الدراسة بعد ذلك على تأثير المعالجة الحرارية على البنية الدقيقة والخصائص الميكانيكية للمركبات Cr2AlC/2024 المصنعة بواسطة خليط الاحتكاك Cr2AlC.

Résumé:

Ce travail porte sur l'étude Les composés de surface 2024 ont a traités en introduisant des molécules de CR-2-ALC comme renforts par traitement, agitation et friction. L'étude consistera ensuite à Effet du traitement thermique sur la microstructure et les propriétés mécaniques des composites 2024/Cr2AlC fabriqué par friction malaxage Cr2AlC.

Sommaire

Chapitre 01 : Généralités sur la phase MAX

I. INTRODUCTION :	2
I.1. Composition chimique des phases MAX :	3
I.2. Structure cristallographique :	4
I.3. Liaison interatomique :	6
I.4. Microstructure :	6
I.5. Propriétés des phases max :	6
I.5.1. Propriétés électriques :	7
I.5.2. Les propriétés élastiques :	9
I.5.3. Matériaux fragiles :	9
I.5.4. Matériaux ductiles :	9
I.5.5. Propriétés thermiques :	11
I.5.6. Propriétés mécaniques :	11
I.6. Comportement en traction et en compression :	13

Chapitre 02 : Les Alliages d'Aluminium

II. INTRODUCTION :	14
II.1. L'aluminium et ses alliages :	15
II.1.1. Propriétés physico-chimiques de l'aluminium :	15
II.2. Désignation numérique :	15
II.3. Signification des désignations :	15
II.4. Etats métallurgiques :	16
II.4.1. Etats fondamentaux :	16
II.5. Alliages de la série 2000 :	17
II.5.1. Microstructure et propriétés mécaniques :	17
II.6. Les alliages d'aluminium Al-Cu :	18
II.6.1. Propriétés générales :	18
II.6.2. Durcissement structural :	18
II.7. L'alliage d'aluminium 2024 T3 :	20
II.7.1. Microstructure de l'alliage :	20
II.7.2. Caractéristique mécanique :	24

Chapitre 03 :Le soudage par friction malaxage (FSP)

III. INTRODUCTION :	26
III.1. Définition du traitement de l'agitation par frottement :	27
III.2. Paramètres du processus de PSF :	28
III.2.1. Force axiale :	28
III.2.2. Vitesse de rotation et de déplacement :	29
III.2.3. Angle d'inclinaison :	30
III.2.4. Profondeur d'insertion :	30
III.2.5. Géométrie de l'outil :	31
III.2.6. NOMBRE DE LAISSEZ-PASSER :	33
III.2. Avantage de la méthode FSP :	33
III.3. Application de la technique FSP :	34

Chapitre 04 :Partie expérimentale

IV. INTRODUCTION :	36
IV.1. Elaboration :	36
IV.2. Mode opératoire :	36
IV.3. Poudres utilisés :	36
IV.4. Pesage :	37
IV.5. Broyage :	37
IV.6. Raffinement des grains :	38
IV.7 Compactage :	38
IV.8. Le soudage par friction malaxage :	39
IV.8.1 Choix de matériaux :	39
IV.8.2. Paramètres utilisés :	40
IV.8.3. Procédures expérimentales :	42
IV.8.4. Paramètres opératoires du soudage SFM:	43
IV.8.5. Bridage :	43
IV.8.6. Prélèvement des échantillons :	43
IV.8.7. Découpage de la tôle :	45
IV.8.8. Polissage des échantillons :	46
IV.8.9. Traitement Thermique :	47
IV.8.10. Test de micro-dureté :	49
IV.8.11. Le teste de tribologie :	50
IV.8.12. Profilomètre :	51

IV.8.13. Microstructure :	52
---------------------------------	----

Chapitre 05 :Interprétationet résultats

V. INTRODATION :	54
V.1. Microstructure :	54
V.2. Micro-dureté :	55
V.3. Tribologie.....	56
V.4. Test de profilomètre :	58
CONCLUSION :	61
Références	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Tableau périodique indiquant les éléments M, A et X pouvant former une phase MAX.....	3
Figure 2: Les trois mailles élémentaires des trois structures des phases MAX: structure211,structure321etstructure413.	4
Figure 3: Des plans enchaînés pour les structures 211, 312 et 413.....	5
Figure 4: a) conception de Ti_3SiC_2 (1120), b) substitution des atomes Si par C et rotation pour éliminer le maillage, c) conception finale de MC (110).....	5
Figure 5: La structure générale d'une céramique.....	6
Figure 6 : Résistivité Électrique de quelques phases MAX en fonction de la température.	7
Figure 7: Courbe contrainte-déformation typique d'un matériau ductile.	10
Figure 8 : Courbes d'élongation-contrainte de Ti_3SiC_2 à différentes températures pour différentes tailles de grains. On remarquera ici l'apparition de 3 régimes en compression	13
Figure 9: Proportion des différents matériaux utilisés dans la conception des avions Airbus A340/330.....	17
Figure 10: Durcissement de l'alliage AL-Cu-Mg (4%Cu) pour des températures proches de l'ambiante	20
Figure 11: Diagramme ternaire AL-Cu-Mg(ASM73).....	21
Figure 12: Schéma de traitement par agitation par frottement.....	27
Figure 13: Schéma du FSP, montrant l'outil rotatif non somable en (a), le chauffage par frottement en plongeant dans la pièce en (b), le chauffage par frottement et adiabatique en (c) et le déplacement de l'outil pour souder/ traiter la pièce en (d).....	28
Figure 14: Profil de sondes à outils FSP coniques, b cylindriques, c cylindriques filetés, d futes cylindriques filetés, e triangulaires, f carrées	32
Figure 15: Poudres utilisées pour la synthèse du Cr_2AlC	37
Figure 16: Balance analytique de précision ADAM.	37
Figure 17: Mortier et pilon.....	38
Figure 18: Poudre homogénéisée.....	38
Figure 19: La pastilleuse utilisée.....	39
Figure 20: Presse Hydraulique de Marque SPECAC.....	39
Figure 21: Tôle d'aluminium 2024.....	40
Figure 22: Estimation du vide entre les plaques.....	41
Figure 23: Addition du renfort en céramiques (eutectique+ Cr_2AlC).....	41
Figure 24: Fraiseuse universel 250*1000.....	42
Figure 25: Procédure de bridage.....	43
Figure 26: Des échantillons du 2024-T3 après FSP.....	44
Figure 27: Découpage de tôle d'aluminium 2024.....	45
Figure 28: Polissage de l'échantillon.....	46
Figure 29: La Pâte diamante.....	46
Figure 30: L'échantillon polisse.....	46
Figure 31: Le four utilisé.....	47

Figure 32: Le récipient.	48
Figure 33: L'échantillon après le traitement.	48
Figure 34: Le duromètre.....	49
Figure 35: Le tribomètre	50
Figure 36: Profilomètre.....	51
Figure 37: Un microscope optique.....	52
Figure 38: Image d'inkscape présentant le résultat du microscope optique montrant le FSP d'échantillon non traité.....	54
Figure 39: Image d'inkscape présente le résultat du microscope optique montrant le FSP d'échantillon HOT traitement.....	54
Figure 40: La variation de dureté change dans chacun de ces échantillons témoin et non traité thermiquement et traité thermiquement Al2024 530 °.....	55
Figure 41: variation coefficient de frottement.....	56
Figure 42: Représente le taux d'usure.....	57
Figure 43: Trace of wear for worn surfaces.....	58
Figure 44: Trace of wear for worn surfaces.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Quelques phases MAX synthétisées	3
Tableau 2: La résistivité et la conductivité Électrique de quelques composés binaires et ternaires.	9
Tableau 3: Caractéristiques physico-chimiques de l'aluminium	15
Tableau 4: Désignation des alliages d'aluminium.	16
Tableau 5: Composition chimique (% massique) de l'alliage 2024.....	20
Tableau 6: Conditions tribologiques utilisés pour les trois systèmes composites.....	36

Chapitre 01 :

Généralité

surlaphaseMAX

I. INTRODUCTION :

Les phases MAX sont une classe de matériaux initialement découverte dans les années soixante grâce aux travaux de l'équipe dirigée par W.Jeitschko et H.Nowonty [1] à Vienne. Cela a conduit à la synthèse de plus de 100 nouveaux carbures et nitrures appelés à l'époque les phases de Hagg « H Phases ». La formule chimique de ces phases est M_2AX , où M est un métal de transition, X du carbone ou de l'azote. Par la suite, Nowonty a synthétisé une quarantaine de phases M_2AX , ainsi que d'autres composés tels que Ti_3SiC_2 et Ti_3GeC_2 [2].

En 1970 [3,4], une étude menée par une équipe russe sur la synthèse des phases Ti_2AlN et Ti_2AlC montre que la micro-dureté des phases synthétisées était comprise entre 21GPa et 24GPa, ce qui ne correspond pas aux valeurs récemment découvertes par d'autres compagnies de recherche.

Plus tard dans les années 90, les « H Phases » ont suscité un intérêt accru de la part de la communauté scientifique, après avoir été abandonnés jusqu'en 1996 [5,6], lorsque Barsoum et El-Raghy [7] de l'Université de Drexel, Philadelphie (USA) ont réussi à synthétiser et à caractériser des échantillons monophasés de composition Ti_3SiC_2 , dont les caractéristiques sont une combinaison intermédiaire entre celles des matériaux céramiques et des matériaux métalliques. Ils sont, comme les céramiques, très rigides, peu denses et très résistants à l'oxydation et aux chocs thermiques. Néanmoins, ils peuvent être ajustés et ont une conduite électrique et thermique satisfaisante.

Cette même équipe synthétise, au début des années 2000, une nouvelle phase Ti_4AlN_3 [8,9], avec des caractéristiques similaires et la même structure de base que la phase Ti_3SiC_2 . Selon les résultats obtenus, ces matériaux, quels qu'ils soient, présentent des compositions chimiques variées tout en partageant une structure cristallographique et des propriétés similaires. Désormais, on les nomme les phases.

$M_{n+1}AX_n$ (avec $n=1,2, \text{ou } 3$) ou plus fréquemment « Phases MAX ».

I.1. Composition chimique des phases MAX :

Les phases MAX sont des carbures et des nitrures hexagonaux stratifiés, dont la formule générale est : $M_{n+1}AX_n$, (MAX) où n varie de 1 à 3

M: est un métal de transition.

A: est un élément du groupe A du tableau périodique

X: est de l'azote ou du carbone.

Periodic Table of MAX phases

$M_{1+n} A X_n$

The periodic table shows the following color-coding for MAX phases:

- Blue (M):** Groups 3-10, 11, 12, and the f-block (lanthanides and actinides).
- Red (A):** Groups 13, 14, 15, and 16.
- Grey (X):** Groups 17 and 18.

Figure 1: Tableau périodique indiquant les éléments M, A et X pouvant former une phase MAX

Le M₂AX, le M₃AX₂ et le M₄AX₃. Elles portent les numéros 211, 312 et 413.

[10]

Le tableau périodique ci-dessous présente les éléments chimiques et leurs correspondants, comme illustré dans la Figure 1.

Catégorie211	Catégorie312	Catégorie413
Ti ₂ CdC, Sc ₂ InC, Ti ₂ AlC, Ti ₂ GaC, Ti ₂ InC, Ti ₂ TiC, V ₂ AlC, V ₂ GaC, Cr ₂ GaC, Ti ₂ AlN, Ti ₂ GaN, Ti ₂ InN, V ₂ GaN, Cr ₂ GaN, Ti ₂ GeC, Ti ₂ SnC, Ti ₂ PbC, V ₂ GeC, Cr ₂ AlC, Cr ₂ GeC, V ₂ PC, V ₂ AsC, Ti ₂ SC, Zr ₂ InC, Zr ₂ TiC, Nb ₂ AlC, Nb ₂ GaC, Nb ₂ InC, Mo ₂ GaC, Zr ₂ InN, Zr ₂ TiN, Zr ₂ SnC, Zr ₂ PbC, Nb ₂ SnC, Nb ₂ PC, Nb ₂ AsC, Zr ₂ SC, Nb ₂ SC, Hf ₂ InC, Hf ₂ TiC, Ta ₂ AlC, Ta ₂ GaC, Hf ₂ SnC, Hf ₂ PbC, Hf ₂ SnN, Hf ₂ SC	Ti ₃ AlC ₂ , V ₃ AlC ₂ , Ti ₃ SiC ₂ , Ti ₃ GeC ₂ , Ti ₃ SnC ₂ , Ta ₃ AlC ₂	Ti ₄ AlN ₃ , V ₄ AlC ₃ , Ti ₄ GaC ₃ , Ti ₄ SiC ₃ , Ti ₄ GeC ₃ , Nb ₄ AlC ₃ , Ta ₄ AlC ₃ ,

Tableau 1: Quelques phases MAX synthétisées

I.2. Structure cristallographique :

Les phases MAX ont une structure hexagonale et sont décrites par le groupe spatial P63/mmc. La figure (2) montre différentes cellules de base en fonction de la valeur de n , dans chaque cas nous avons des couches alternées de M éléments séparées par des couches d'éléments A, X atomes remplissant les positions octaèdre entre M couches, la différence entre ces trois groupes réside uniquement dans le nombre de couches M , dans le cas du groupe 211 (par exemple Ti₂PbC, Zr₂PbC, Hf₂PbC), nous avons deux couches d'éléments M, trois couches pour le groupe 312 et quatre couches pour le groupe 413.

Cependant, dans tous les cas, les sites octaédriques atomiques et ils peuvent donc accueillir des atomes A plus gros, les octaèdres M₆X sont identiques à ceux que l'on retrouve dans une structure cubique de type NaCl.

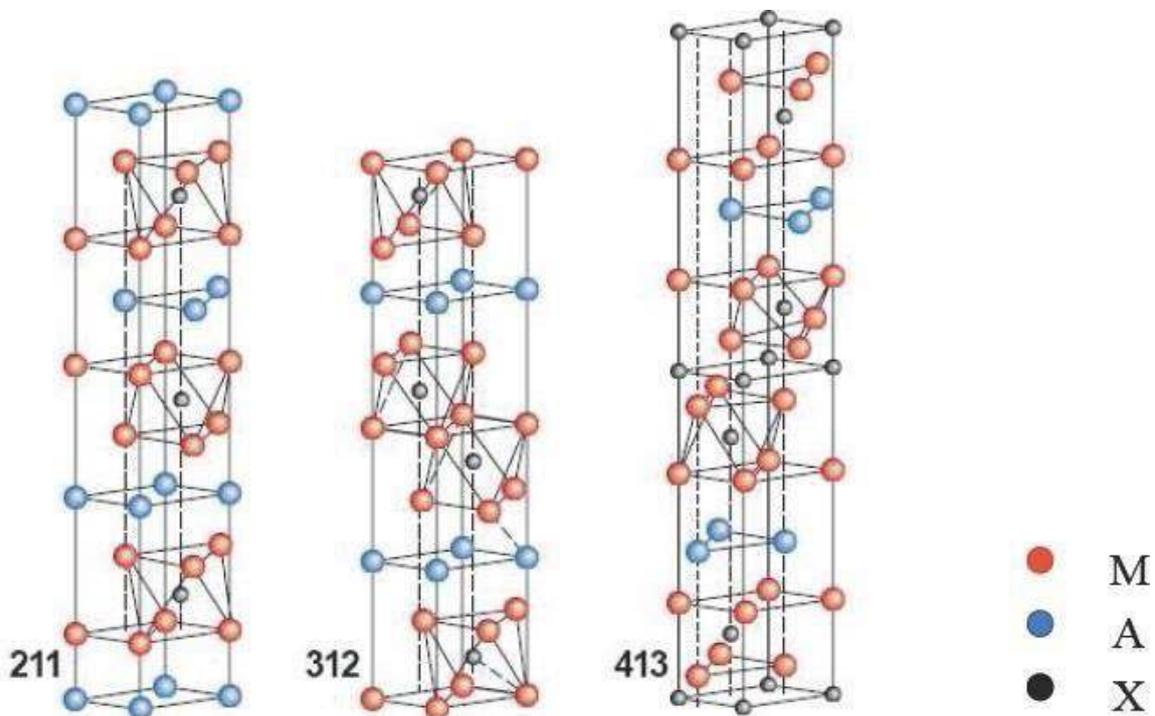


Figure 2: Les trois mailles élémentaires des trois structures des phases MAX: structure 211, structure 312 et structure 413. [12]

La distinction entre les trois structures réside dans le nombre de couches octaèdres qui séparent les plans métalliques A. Les matériaux nano-lamellaires sont caractérisés par une couche d'octaèdres M₆X pour une phase M₂AX (211), deux couches pour une phase M₃AX₂ (312), et trois couches pour une phase M₄AX₃ (413).

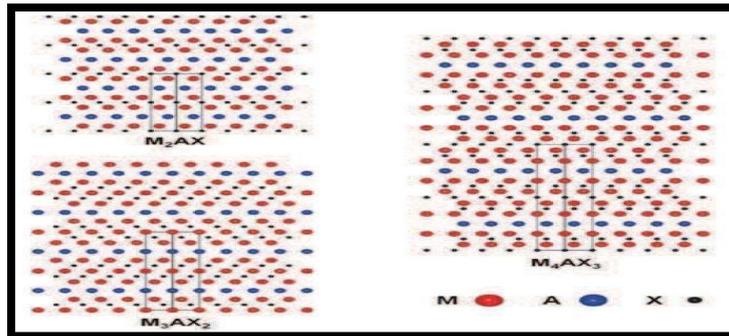


Figure 3: Des plans enchaînés pour les structures 211, 312 et 413 [12].

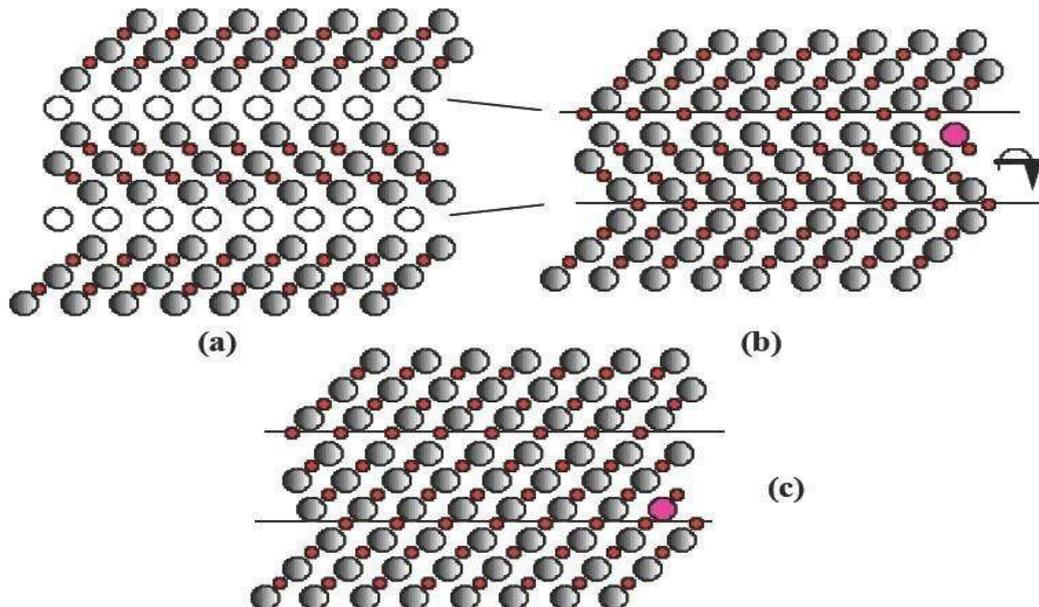


Figure 4: a) conception de Ti_3SiC_2 (1120), b) substitution des atomes Si par C et rotation pour éliminer le maillage, c) conception finale de MC (110).[14]

La phase $M_{n+1}AX_n$ est proche, sur le plan structural et sur les caractéristiques, du composé binari stœchiométrique $M_{n+1}X_n$ auquel elle s'apparente à de nombreux points. Il convient de souligner leurs similarités structurales. Par exemple, la transformation de Ti_3SiC_2 en TiC a été illustrée par Bar soum [13] en utilisant un processus à trois étapes, comme le montre schématiquement la figure (4) [14].

- Tout d'abord, on substitue les atomes de silicium par des atomes de carbone, ce qui donne lieu à une structure de type NaCl fortement maillée où les plans occupés par les atomes de silicium sont désormais des plans miroir.
- On élimine la macération entre les unités Ti_3C_2 voisines en tournant autour d'un axe perpendiculaire à l'axe c.
- En ce qui concerne Ti_3SiC_2 , on peut donc obtenir un plan (110) de TiC . La réduction de 15 % du volume de la maille est due à cette transformation, ce qui en fait l'un des modes de réaction et de décomposition privilégiés de Ti_3SiC_2 .

I.3. Liaison interatomique :

Il a été démontré par les calculs que les principaux types de liaisons présents dans les phases MAX sont les suivants : métalliques, covalentes et ioniques. En général, il est important de noter que les principales liaisons interatomiques dans les phases MAX sont les suivantes :

- Dans les couches M-X, les atomes M et X établissent une forte liaison covalente, ce qui explique la grande rigidité des phases MAX.
- En général, la liaison M - A est inférieure à la liaison M - X.
- La liaison métallique M-M

I.4. Microstructure :

La structure générale des céramiques est schématisée sur la figure (5), elle peut comprendre des grains de phases identiques ou différentes, séparés par des joints de grains, des défauts, liés aux procédés de fabrication, peuvent également être présents et fragiliser la structure, ces défauts sont des porosités résiduelles après frittage ou des microfissures apparaissant aux joints de grains lors du refroidissement.

La connaissance de la microstructure (granulométrie), ainsi que du type et de la taille des défauts qui apparaissent initialement dans la structure est essentielle, ces informations peuvent influencer de manière significative le comportement du matériau (ex. état de rupture en cas de défauts).

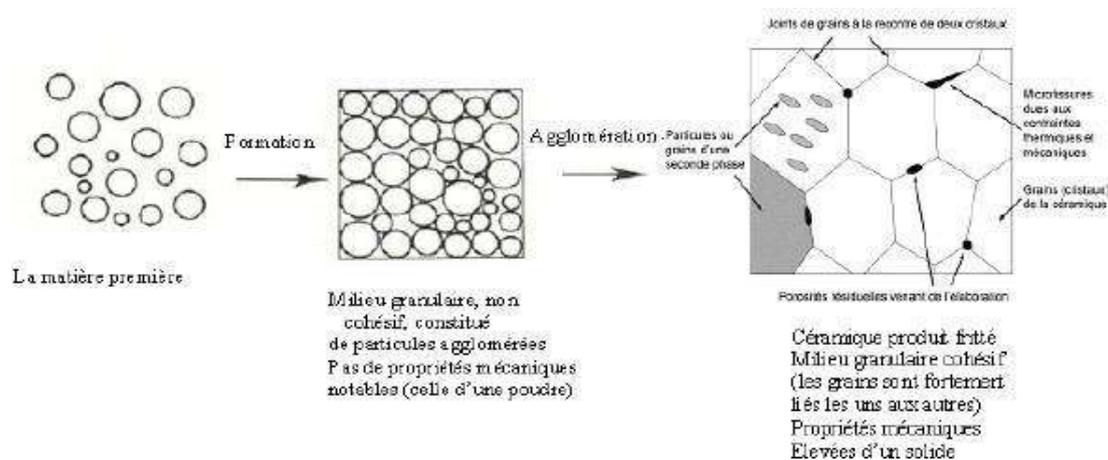


Figure 5: La structure générale d'une céramique

I.5. Propriétés des phases max :

Les phases MAX rassemblent les caractéristiques les plus performantes des métaux et des céramiques, tant sur le plan thermique, élastique, chimique qu'électrique. Les phases $M_{n+1}AX_n$ présentent les mêmes bénéfices que l'élément binaire MX_n correspondant respectivement.

I.5.1. Propriétés électriques :

Les phases MAX offrent une excellente conductivité électrique : Leur conductivité électrique varie de $0.37 \cdot 10^6 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}^{-1}$ à $14.3 \cdot 10^6 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}^{-1}$ avec des valeurs de résistivité allant de $0.07 \cdot 10^6 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}$ à $2.7 \cdot 10^6 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}$. Cela les place dans le domaine de la conduction métallique. Comme pour les métaux, leur conductivité augmente de manière linéaire avec la diminution de la température et leur résistivité diminue de manière linéaire lorsque la température

$$P(T) = P_{300} [1 + \alpha (T - 300)] \quad \text{pour } T > 100\text{K}$$

Où α est le coefficient de température de la résistivité.

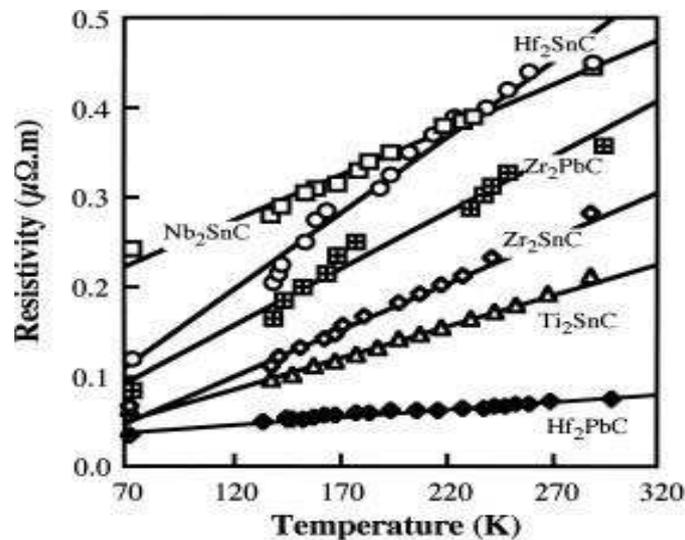


Figure 6 : Résistivité Électrique de quelques phases MAX en fonction de la température. [15]

La figure (6) présente les résistivités des différentes phases MAX en fonction de la température. On peut observer que la conductivité électrique de Hf₂SnC est inférieure à $2.2 \cdot 10^6 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}^{-1}$ et maximale à $13.4 \cdot 10^6 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}^{-1}$, tandis que les autres phases se situent dans l'intervalle de $2.2 \cdot 10^6 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}^{-1}$ à $13.4 \cdot 10^6 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}^{-1}$. De cette manière, il est observé que sur le plan électrique, les phases MAX présentent pratiquement les mêmes bénéfices que l'élément binaire MX correspondant (voir le tableau (2)). Il est également possible de constater que la conductivité de Hf₂PbC est similaire à celle de l'aluminium 1 (Hf₂PbC = σ_{AL} .) Elle est considérablement supérieure à celle du Pb et du Sn (voir le tableau (2)).

Composés	La résistivité électrique ($\mu\Omega\text{m}$)	La conductivité électrique ($\mu\Omega\text{m}$)
Ti ₂ SnC	0.22	4.54
Zr ₂ SnC	0.28	3.57
Nb ₂ SnC	0.45	2.22
Hf ₂ SnC	0.45	2.22
Zr ₂ PbC	0.36	2.77
Hf ₂ PbC	0.075	13.33
Ti ₃ SiC ₂	0.22	4.54
TiC	0.4-0.59	2.5-1.69
ZrC	0.34-0.59	2.94-1.78
NbC	0.56	1.78
HfC	0.45-0.37	2.22-2.70
Sn	0.1	10
Pb	0.2	5

Tableau 2: La résistivité et la conductivité Électrique de quelques composés binaires et ternaires.[15]

I.5.2.Les propriétés élastiques :

Si un cristal est soumis à une contrainte, il se déforme de manière linéaire par rapport à cette contrainte, à condition que la déformation provoquée soit faible. Lorsque la contrainte est supprimée, le matériau revient à son état normal de manière réversible. Ce comportement est commun à tous les matériaux et est appelé élastique. Si la déformation dépasse un seuil donné, deux comportements sont observés : [16]

I.5.3.Matériaux fragiles :

Avant de quitter le régime élastique, le matériau rompt. La rupture dite fragile se distingue par l'absence de déformation plastique macroscopique, ce qui permet une propagation rapide des sùres avec une faible consommation d'énergie. La rupture est très nette et suit des plans cristallographiques. On parle de rupture par clivage (par exemple, les verres, les céramiques, les métaux cubiques centrés ou certains polymères).

I.5.4. Matériaux ductiles :

En dehors du régime élastique (défini par la limite d'élasticité), se développe le régime plastique, comme illustré dans la figure (7). Le matériau commence à se déformer de manière irréversible grâce à un glissement des

plans atomiques les uns sur les autres, ce glissement se produit grâce au déplacement de défauts linéaires appelés dislocations. De la limite d'élasticité à la contrainte ultime, on observe un régime de durcissement par déformation plastique, également connu sous le nom d'écrouissage.[17]

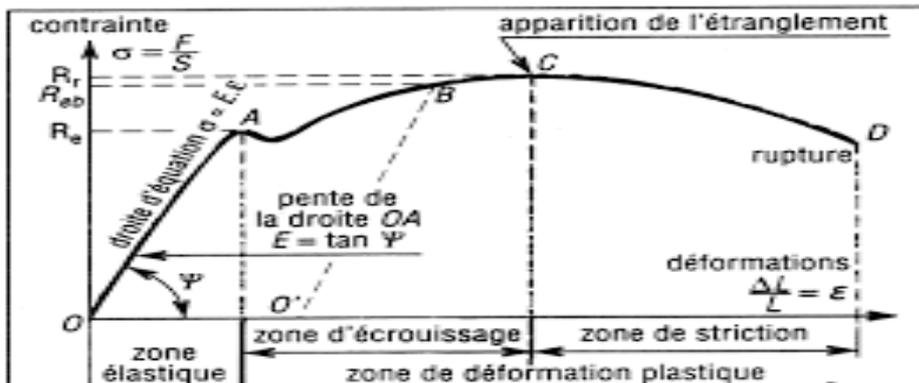


Figure 7: Courbe contrainte-déformation typique d'un matériau ductile.

Les mouvements des dislocations atomiques entraînent ce durcissement, et lorsque la contrainte ultime est dépassée, un étranglement se forme (necking) et le matériau se brise. La limite d'élasticité d'un matériau est influencée par divers facteurs, dont les principaux sont :

- Les forces de cohésion entre atomes : À mesure que les liaisons entre les atomes sont plus fortes, il devient plus difficile de les déplacer, ce qui entraîne une augmentation de la limite d'élasticité. La composition cristalline : Les glissements sont plus faciles sur les plans atomiques à forte densité, les cristaux ayant le plus de glissements sont ceux avec une structure cubique à face centrée. En réalité, les matériaux les plus ductiles tels que l'or, le plomb, l'aluminium et le cuivre sont des cristaux cubiques à face centrée.
- Les atomes extérieurs entravent les dislocations, les métaux purs sont plus ductiles que les métaux alliés.
- Les dislocations sont entravées par les joints de grain, plus il y a de joints de grain, plus les cristallites sont petites, plus la limite d'élasticité est élevée.
- Plus les dislocations sont présentes dans le matériau, plus la limite d'élasticité est élevée (écrouissage). La température joue un rôle essentiel

dans ces facteurs, donc la limite élastique est également influencée par la température.

Le module élastique est une grandeur physique qui représente l'élasticité d'un matériau. Ce module élastique évalue la rigidité d'un matériau. Les solides qui sont soumis à de petites déformations sont décrits par la loi de Hooke.

$$\sigma = Y \varepsilon$$

Là σ est la contrainte éprouvée par le matériel et Y est de Young.

Les phases MAX se distinguent par leur rigidité élastique, avec un module de Young d'environ 300 GPa. Les structures 211, qui ont moins de liaisons M-X que les autres, présentent une légère résistance par rapport aux composés 312. E (Ti_2SnC) est de 275,4 GPa, E (Zr_2SnC) est de 252,1 GPa et E (Ti_3SiC_2) est de 320 GPa. De même, les modules de compression B de toutes les structures des phases MAX sont situés entre 120 GPa et 200 GPa (par exemple, B (Ti_2SnC) = 159 GPa, B (Zr_2SnC) = 149 GPa).[16]

Tous ces matériaux ont des coefficients de Poisson proches de 0,2, même si les températures de Debye des phases MAX sont relativement élevées et comparables à celles des céramiques plutôt qu'à celles des métaux.

I.5.5. Propriétés thermiques :

Les phases MAX peuvent être utilisées dans de nombreuses applications à haute température, mais il est crucial de saisir leurs caractéristiques thermiques et leur comportement à haute température. Les phases MAX sont également de très bons conducteurs de chaleur, avec des conductivités thermiques allant de 12 à 60 W/(m.K) à température ambiante, comme la plupart des céramiques techniques [19].

I.5.6. Propriétés mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des phases MAX surprennent. La plupart des recherches ont été menées sur le composé Ti_3SiC_2 . Comme pour la plupart des matériaux, les caractéristiques mécaniques du Ti_3SiC_2 sont influencées par la granulométrie. Les paragraphes suivants traiteront de deux

types de microstructures distinctes : les microstructures à petits grains (FG : fine grains) et les microstructures à gros grains (CG : Coarse Grains).

entre la fragilité et la ductilité du matériau. Selon la représentation CDI c'est un frottement influencé par la microstructure de l'échantillon : elle est plus élevée pour les microstructures à grains fins lors des tests de fusion. En outre, elle diffère grandement en fonction de la nature de l'essai pour une microstructure spécifique.

Chapitre 02 :
Les
Alliages d'Aluminium

II. INTRODUCTION :

Le troisième élément de l'écorce terrestre en quantité est l'aluminium, après l'oxygène et le silicium. Depuis le début du XIXe siècle, ce métal est connu et a longtemps été considéré comme un métal précieux en raison de la difficulté de réduction de l'oxyde d'aluminium, une forme sous laquelle il se trouve dans la nature. Le procédé d'électrolyse de l'oxyde d'aluminium dissous dans un bain de cryolithe en fusion fut découvert en 1886 par Héroult en France et Hall aux États-Unis. Grâce à cette découverte, l'aluminium est devenu le principal métal non ferreux utilisé dans l'industrie.

La production d'aluminium ne représente que 2 % environ de celle des aciers en termes de tonnage. Toutefois, ce métal et ses alliages sont à la deuxième place dans l'emploi des matériaux métalliques. L'aluminium occupe cette position grâce à un ensemble de caractéristiques qui en font un matériau exceptionnel. Il y a deux catégories principales d'alliages d'aluminium, à savoir les alliages qui peuvent ou non être soumis à un durcissement structural.

En ce qui concerne les alliages d'aluminium qui favorisent le durcissement structural, comme les séries 2xxx, 6xxx et 7xxx, les caractéristiques mécaniques sont améliorées lorsque des secondes-phases sont dispersées dans la matrice. Quand il y a des précipitations, le mouvement devient plus difficile pour une contrainte spécifique, ce qui entraîne une augmentation de la résistance mécanique du matériau.

II.1. L'aluminium et ses alliages :

II.1.1. Propriétés physico-chimiques de l'aluminium :

Point de fusion :	$t_f = 660 \text{ °C}$	Structure cristalline :	CFC
Masse volumique :	$\rho = 2\,700 \text{ kg/m}^3$	Résistivité électrique :	$\rho = 0,0265 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{m}$
Conductivité thermique :	$\lambda = 237 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	Coefficient de dilatation : linéique (à 20 °C)	$\alpha = 23,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Propriétés mécaniques à 20°C (Al pur)			
$R_m =$	70 à 80 MPa	$R_e =$	10 à 20 MPa (très sensible à l'écroutissage)
$A_{\%} =$	50 à 60 %	$E =$	70 000 MPa

Tableau 3: Caractéristiques physico-chimiques de l'aluminium

II.2. Désignation numérique :

Les alliages d'aluminium sont nommés selon les règles de l'aluminium à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres. Ces quatre numéros permettent de déterminer la composition chimique de l'alliage. Ces quatre chiffres sont parfois accompagnés d'une lettre qui indique une variante nationale. Il convient de souligner que selon la norme européenne EN 573-1, il est nécessaire de précéder cet ensemble de quatre chiffres pour les alliages susceptibles de subir une corrosion par le préfixe EN, les lettres « A » (aluminium), « w » (pour les produits corroyés) et un tiret « - ». La notation exhaustive est peu fréquemment employée.

II.3. Signification des désignations :

Le premier nombre désigne le principal composant d'alliage. Le second nombre correspond à une variante de l'alliage initial. Il s'agit souvent d'un intervalle plus restreint dans un ou plusieurs éléments d'alliage. Les numéros trois et quatre sont utilisés comme des numéros d'ordre pour identifier l'alliage. La série 1000 est la seule exception, ces deux chiffres représentant le pourcentage d'aluminium.

Série	Désignation	Elément d'alliage principale	Phases
Série 1000	1xxx	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2xxx	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3xxx	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4xxx	Silicium (Si)	-
Série 5000	5xxx	Magnésium (Mg)	AlMg ₂
Série 6000	6xxx	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg ₂ Si
Série 7000	7xxx	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8xxx	Autres éléments	-
Série 9000	-	Non utilisé	-

Tableau 4: Désignation des alliages d'aluminium.

II.4. Etats métallurgiques :

II.4.1. Etats fondamentaux :

Les alliages d'aluminium peuvent être obtenus dans différents états : recuits, écrouis ou trempés et vieillis. Ces différents états sont généralement représentés par des symboles. Ces appellations concernent à la fois les alliages corroyés et les alliages de fonderie. Cinq états fondamentaux sont identifiés de la manière suivante :

- ✓ **F** : état brut de livraison : ce symbole est utilisé pour les produits fabriqués par déformation plastique sans que les taux de durcissement ou d'adoucissement causés par la déformation ou un traitement thermique éventuel soient particulièrement contrôlés.
- ✓ **O** : L'état recuit est l'état le plus rigide. En général, il est obtenu par le processus appelé recuit, ce processus ne s'accompagne pas d'un écrouissage, même par planage ou dressage.
- ✓ **H** : état de déformation écroui et éventuellement partiellement adouci : ce symbole est utilisé pour les produits durcis par déformation, qu'ils soient maintenus à une température adéquate pour entraîner un adoucissement partiel du métal.
- ✓ **W** : état non stabilisé trempé : c'est un état métallurgique instable : il concerne les alliages qui ont été mis en solution puis trempés et qui continuent de se développer à température ambiante
- ✓ **T** : Les traitements thermiques utilisés pour durcir l'état sont des combinaisons de différents traitements tels que la mise en solution, la trempe, la maturation et le retour, avec éventuellement l'application de déformations plastiques.

II.5. Alliages de la série 2000 :

II.5.1. Microstructure et propriétés mécaniques :

L'aluminium est le deuxième métal le plus couramment employé à travers le monde en raison de sa légèreté et de sa grande résistance à la corrosion dans de nombreux environnements. Effectivement, il est l'un des matériaux les plus légers, avec une masse volumique de 2700 kg.dm^{-3} . L'aluminium et ses alliages sont des matériaux très prisés dans le domaine de l'aéronautique, notamment dans la conception des avions (représentant 73% sur l'A340, comme illustré dans la Figure 9).

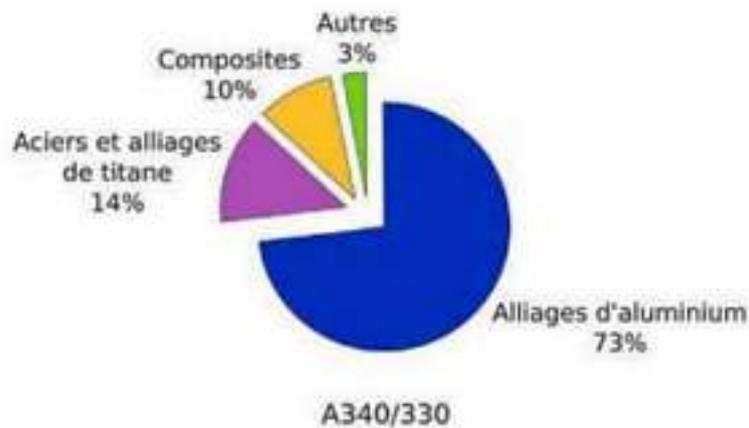


Figure 9: Proportion des différents matériaux utilisés dans la conception des avions Airbus A340/330

Pour améliorer certaines caractéristiques telles que les caractéristiques mécaniques, la capacité à se former ou la soudabilité, divers alliages d'aluminium ont été créés. L'alliage est désigné en fonction de l'élément d'alliage principal. On peut classer les divers alliages d'aluminium de corroyage en deux catégories :

- Les alliages à écrouissage à chaud et éventuellement à froid sont soumis à plusieurs étapes de mise en forme, avec des recuits intermédiaires ou finaux.

Série	Éléments d'alliage
1000	Al -99%
3000	Al-Mn
5000	Al-Mg
8000	Al – autres éléments que Cu, Mn, Si, Mg et Zn

Les alliages à durcissement structural .

Série	Eléments d'alliage
2000	Al-Cu et Al-Cu-Mg
6000	Al-Mg-Si
7000	Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu

Il existe également des alliages de fonderie comme les alliages de la série 4000 (AlSi).

II.6. Les alliages d'aluminium Al-Cu

Le fait d'ajouter du Cu en tant qu'élément d'alliage principal est associé à la quête de propriétés mécaniques améliorées pour les alliages en aluminium. Effectivement, cela favorise la formation d'une phase durcissant, ce qui améliore les caractéristiques mécaniques générales de l'alliage tout en préservant une légèreté relativement élevée. Par contre, en raison de cette composition chimique et de la microstructure associée, les alliages d'aluminium de la série 2xxx ont généralement une résistance à la corrosion relativement faible par rapport à l'aluminium pur.

II.6.1. Propriétés générales

Les alliages Al-Cu de la série 2xxx peuvent être regroupés en différentes catégories en fonction de leur usage. Les alliages utilisés pour la déformation plastique sont ceux qui ont une résistance à la corrosion élevée, une capacité à être emboutissés et soudés (par exemple, l'alliage 2117 avec une teneur en cuivre de 2,2-3% et du magnésium de 0,2-0,5%, en % en poids). Les métaux résistants

La mécanique élevée, qui comprend environ 4% de cuivre, se distingue par une excellente résistance à la chaleur, mais une soudabilité et une faible résistance à la corrosion. Parmi ces alliages, on retrouve l'alliage 2024 dans des domaines tels que les transports aéronautiques et la mécanique. La dernière catégorie concerne les alliages utilisés pour le décolletage. Dans ce cas, des ajouts de bismuth et/ou de plomb sont réalisés afin d'obtenir des copeaux cassants.

II.6.2. Durcissement structural :

Le processus de durcissement structural des alliages Al-Cu, qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau, est effectué en trois étapes distinctes :

- Tout d'abord, l'alliage est chauffé à une température supérieure à celle du liquide pendant une période adéquate afin d'atteindre l'équilibre

thermodynamique et ainsi d'obtenir une mise en solution complète des atomes de soluté.

- Par la suite, la trempe (refroidissement rapide de l'alliage) prévient la décomposition de la solution solide, ce qui entraîne la formation de grossiers précipités d'équilibre. Une solution solide sursaturée en soluté est obtenue lorsque les atomes de soluté sont aléatoirement placés aux nœuds du réseau à faces cubiques centrées de l'aluminium (on parle alors de solution solide de transformation).
- Lorsqu'on maintient la température après la trempe, on constate un durcissement considérable de l'alliage. On nomme cette étape l'étape de revenu. Le temps et la température de maintien influencent le durcissement obtenu. Il s'agit d'un phénomène de précipitation qui se produit lorsque la solution solide sursaturée se décompose pendant le maintien isotherme, ce qui entraîne le durcissement de l'alliage.

Ce procédé favorise la création de précipitations connues sous le nom de précipitations durcissantes, qui se forment soit lors de la trempe à l'eau, soit lors du traitement de revenu de manière contrôlée. Toutefois, on peut observer et différencier deux autres catégories de particules intermétalliques en fonction de leur mode de formation, car les alliages renferment un nombre considérable d'éléments d'alliages (ajoutés intentionnellement pour modifier certaines caractéristiques du matériau) ou d'impuretés :

- Les particules solides qui se forment par précipitation. Après avoir été formées, ces particules ne peuvent pas être dissoutes entièrement, mais leur fraction volumique, leur taille et leur distribution peuvent être altérés par des traitements thermomécaniques.
- Les particules grossières intermétalliques : les impuretés (telles que le fer et le silicium) présentes dans tous les alliages commerciaux sont initialement présentes dans la solution liquide, mais elles se combinent avec d'autres éléments et se séparent lors de la solidification pour former des particules grossières intermétalliques. Il est possible qu'elles se brisent lors des traitements thermiques, mais elles ne peuvent pas être résolues.

II.7. L'alliage d'aluminium 2024 T3 :

La composition de l'alliage 2024 est composée principalement de cuivre et de magnésium. On peut voir sa composition chimique dans le Tableau 5.

% (en masse)	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si
2024	Base	4,4	1,5	0,6	0,2	0,1

Tableau 5: Composition chimique (% massique) de l'alliage 2024

Le traitement thermique T3 implique une mise en solution à une température de 495°C (+/- 5°C), une trempe à l'eau, des déformations plastiques (allongement par traction d'environ 1 à 2 %) pour augmenter le nombre de germes de précipités durcissants et diminuer les contraintes, et enfin, un traitement de rétablissement de quatre jours à une température de 25°C. Le revenu à température ambiante (maturation) à différentes températures proches de l'ambiante a un impact sur la durcissement d'un alliage Al-Cu-Mg, comme illustré dans la Figure 10.

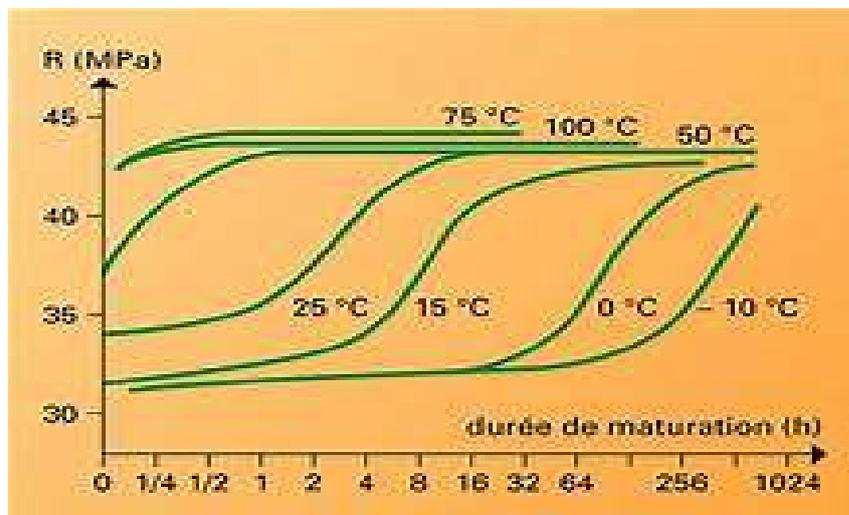


Figure 10: Durcissement de l'alliage AL-Cu-Mg (4%Cu) pour des températures proches de l'ambiante .

Quatre jours plus tard, à 25°C, l'alliage a presque atteint son point de durcissement maximal.

II.7.1. Microstructure de l'alliage :

Comme nous l'avons déjà mentionné, on ajoute du cuivre à l'aluminium afin d'obtenir une phase durcissant et donc de meilleures propriétés mécaniques. En ajoutant du magnésium à l'alliage Al-Cu, les propriétés mécaniques de l'alliage augmentent également considérablement lors de l'étape

de maturation. Le silicium et le manganèse sont ajoutés pour stimuler la formation de composés quaternaires. En dispersant, ces derniers contribuent à améliorer les caractéristiques de la matrice. La majorité des alliages industriels Al-Cu-Mg, y compris l'alliage 2024, renferment une quantité excessive de cuivre par rapport à la coupe quasi binaire Al-Al₂CuMg (les alliages dont le rapport entre le cuivre et le magnésium est de 2,2 font partie du système approximativement quasi binaire Al-Al₂CuMg). L'illustration I-3 montre que

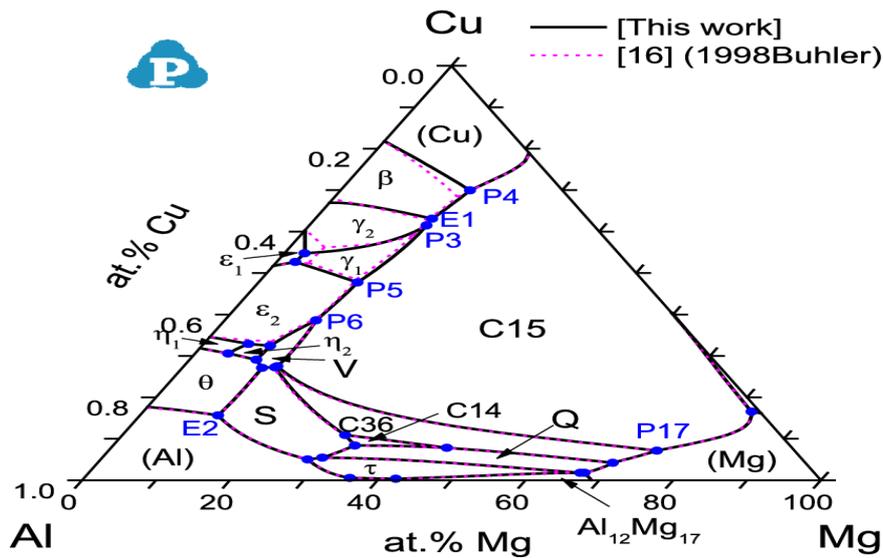
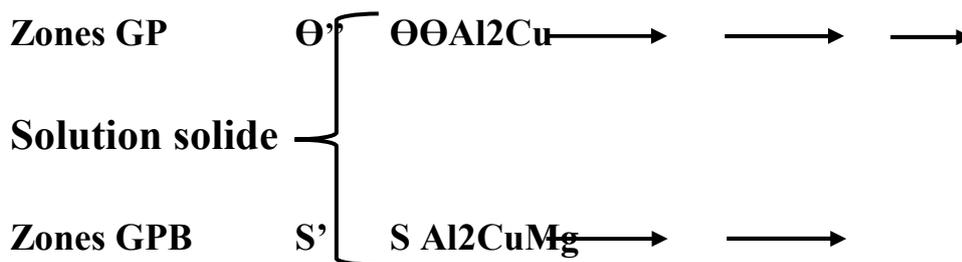


Figure 11: Diagramme ternaire AL-Cu-Mg(ASM73).

L'alliage 2024 T351 présente donc, suite au traitement de durcissement structural, une séquence de précipitation mixte :



Les zones de Guinier-Preston, également appelées zones GP, sont constituées de disques plans parallèles aux plans (100) de la matrice. Les plaquettes parallèles aux plans {100} de la matrice sont précipitées dans la phase θ , qui est cohérente avec la matrice. La phase θ' est une phase semi-cohérente qui présente également des plaquettes dans la matrice précipitante. Le composé d'équilibre Al₂Cu, appelé phase θ , est complètement incompatible avec la matrice.

La décomposition de l'alliage est toujours en voie d'équilibre, mais en fonction du traitement des revenus, elle peut être plus ou moins complexe. La décomposition de la solution solide sursaturée s'arrête à θ'' ou θ' lorsque la température de revenu est inférieure à 200°C ; pour des températures plus élevées, on peut obtenir directement θ' .

Au cours d'un processus de maturation à température ambiante, seules les zones GP sont obtenues.

L'alliage contient 1,5% de Mg, ce qui entraîne la formation de nouvelles phases. Les zones GPB (Guinier-Preston-Bagaryatsky), ainsi dénommées pour les distinguer des zones GP, sont des structures d'atomes de Cu et Mg à courte distance. Les phases S'' et S' sont des phases de transition qui sont respectivement cohérentes et semi-cohérentes avec la matrice (S'' n'est pas mentionnée dans la séquence de précipitation car son existence même est soumise à des solutions solides telles que les zones GP θ'' θ' θ Al₂Cu zones GPB S' S Al₂CuMg alliage 2024 Chapitre I. Synthèse bibliographique 17 controversée). La phase S , également connue sous le nom d'Al₂CuMg, est une phase qui se trouve à l'équilibre, incohérente avec la matrice et qui crée des plaquettes.

Selon Buchheit et ses collègues, dans une recherche sur les phénomènes de dissolution liés aux particules de phase S , il est signalé que l'alliage 2024 T3 ne contient pas de particules de phase θ . On indique que pour les alliages avec des compositions chimiques similaires à celles de l'alliage 2024, il est envisageable de créer une phase θ lors de la solidification ou du traitement thermique.

De plus, le rapport entre les phases θ et S est extrêmement bas dans les alliages Al-Cu-Mg lorsque le rapport des concentrations Cu:Mg est compris entre 4:1 et 1,5:1 (dans le cas de l'alliage 2024, le rapport Cu:Mg est compris entre 4:1 et 2:1). Il est également intéressant de remarquer que de nombreux articles ne font pas référence à une séquence de co-précipitation, mais seulement à une séquence de précipitation Al₂CuMg. Étant donné les traitements thermomécaniques que le matériau subit, il y a d'autres phases dans l'alliage et qui peuvent être observées à diverses échelles.

Au microscope optique, les particules grossières intermétalliques peuvent être observées. Les particules de l'alliage 2024 sont plutôt sphériques et sont riches en Cu et en Mg, ce qui correspond à la phase S ou Al₂CuMg. Elles mesurent environ 5 μm de taille moyenne. Des particules irrégulières riches en Cu, Fe et Mn sont également observées. La taille moyenne de ces particules est de 30 μm et elles occupent environ 2,8 % de la surface, tandis que la fraction surfacique couverte par les particules Al₂CuMg n'est que d'environ 1 % [Gui98b]. Pour

étudier la corrosion par piqûres sur l'alliage 2024 T3 en utilisant l'analyse de corrosion.

Boag et ses collègues ont confirmé la présence de particules intermétalliques de type Al-Cu-Mn-Fe avec une taille moyenne de 20 μm , ainsi que de particules de type Al_2CuMg de taille inférieure aux précédentes grâce à leur microscopie nucléaire.

En outre, les recherches menées par Buchheit et ses collègues ont révélé la présence de 61,3% d' Al_2CuMg (phase S), 12,3% d' $\text{Al}_6(\text{Cu,Fe,Mn})$, 5,2 % d' $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ et 4,3 % de $(\text{Al,Cu})_6\text{Mn}$ dans l'alliage 2024 (en ce qui concerne la fraction surfacique couverte par les particules intermétalliques).

Néanmoins, 17 % des phases intermétalliques demeurent non classées. Cet article souligne aussi le fait qu'il n'y a pas de zone appauvrie en Cu autour des particules de la phase S.

De plus, des dispersoïdes en plaquettes $\text{Al}_{20}\text{Mn}_3\text{Cu}$ sont observés, avec une taille moyenne d'environ 200 nm. La distribution de ces dispersoïdes dans la matrice est homogène et ils se trouvent au niveau des joints de grains. Cependant, le voisinage des particules grossières intermétalliques est exempt de dispersoïdes. On désigne cette zone sans dispersoïde sous le nom de « zone sans précipitations » ou PFZ. Les analyses EDX ont révélé que cette zone présentait une diminution de 10 à 20% du taux de Cu par rapport au reste de la matrice [Gui98b].

Selon Zhang et Frankel [Zha03a], dans une recherche sur les liens entre la corrosion par piqûres et la corrosion intergranulaire de l'alliage 2024, ils ont effectué une analyse microstructurale de l'alliage à l'état T3. Dans l'alliage 2024 T3, la microscopie électronique en transmission (MET) met en évidence la présence de précipités durcissant de phases GP et S.

Il met aussi en évidence la présence de particules en forme de baguettes contenant des éléments d'aluminium, de cuivre et de manganèse (probablement $\text{Al}_3\text{Mn}_2\text{Cu}_2$) dans les grains. On a repéré de nombreuses particules en forme de bâtonnets dans les joints de grains. Suite à l'analyse EDS (spectroscopie dispersive en énergie), il est constaté que ces particules présentent diverses compositions chimiques : Al_2Cu (très faible concentration en Mg), Al_2CuMg ou $\text{Al}_3\text{Mn}_2\text{Cu}_2$ (sans Mg).

On ajoute des particules contenant du Cu et du Mn dans le matériau pour réguler la recristallisation et la croissance des grains. On a également repéré quelques particules AlCu-Mn-Fe dans les joints de grains. Toutefois, les auteurs n'ont pas remarqué de PFZ le long des joints de grains, c'est-à-dire la

présence d'une zone dépourvue de précipités et appauvrie en Cu en raison de la présence de particules riches en Cu qui se sont précipitées aux joints de grains.

II.7.2. Caractéristique mécanique :

Les caractéristiques mécaniques de l'alliage 2024 T351 sont supérieures à celles de l'aluminium pur, mais bien inférieures à celles de certains aciers. Il se distingue aussi par sa ténacité et sa résistance à la propagation des criques. Dans sa version T3, ses principales utilisations sont liées à la construction aéronautique.

Etant donné la présence de nombreuses particules secondaires, la rupture d'un alliage d'aluminium sain est de type ductile avec la formation de cavités.

Chapitre 03 :

Le soudage par friction malaxage(FSP)

III. INTRODUCTION :

L'étude et la conception des matériaux composites ont attiré une attention significative dans divers domaines de la chimie moderne depuis près d'un siècle. Ces matériaux, caractérisés par leurs structures hétérogènes, isotropes ou anisotropes, présentent fréquemment des performances supérieures en termes de propriétés chimiques et mécaniques par rapport aux matériaux homogènes.

Cela inclut des propriétés telles que les caractéristiques optiques, thermiques et diélectriques. Par conséquent, les composites présentent un immense potentiel et offrent des perspectives très prometteuses pour un large éventail d'applications.

III.1. Définition du traitement de l'agitation par frottement :

Le traitement par agitation par friction (FSP) est une technique d'assemblage à l'état solide et de traitement des matériaux utilisée pour modifier la microstructure et les propriétés des métaux et des alliages. Il s'agit d'une variante du soudage par friction, qui a été initialement développé pour les matériaux d'assemblage. Dans FSP, un outil rotatif spécialement conçu avec une broche non consommable est inséré dans la pièce, qui est généralement une plaque métallique ou un composant.

L'outil est ensuite parcouru le long de la surface, générant de la chaleur et des déformations mécaniques dans le matériau. Lorsque l'outil se déplace, la chaleur de frottement ramollit le matériau sans atteindre son point de fusion. L'action de mélange mécanique de la tige rotative décompose la structure de grain d'origine et favorise la formation d'une microstructure homogène à grain fin.

Cela peut entraîner divers changements souhaitables dans le matériau, tels que le raffinement du grain, la dissolution des précipités, la redistribution des éléments d'alliage et l'amélioration des propriétés mécaniques. FSP a été largement utilisé pour améliorer les propriétés des matériaux métalliques, y compris l'amélioration de leur résistance, dureté, résistance à la fatigue et résistance à la corrosion. Il est particulièrement utile pour le traitement de matériaux difficiles à souder, tels que les alliages d'aluminium et les aciers, car il évite les inconvénients associés aux procédés de soudage conventionnels à base de fusion, tels que les défauts de solidification et les contraintes résiduelles.

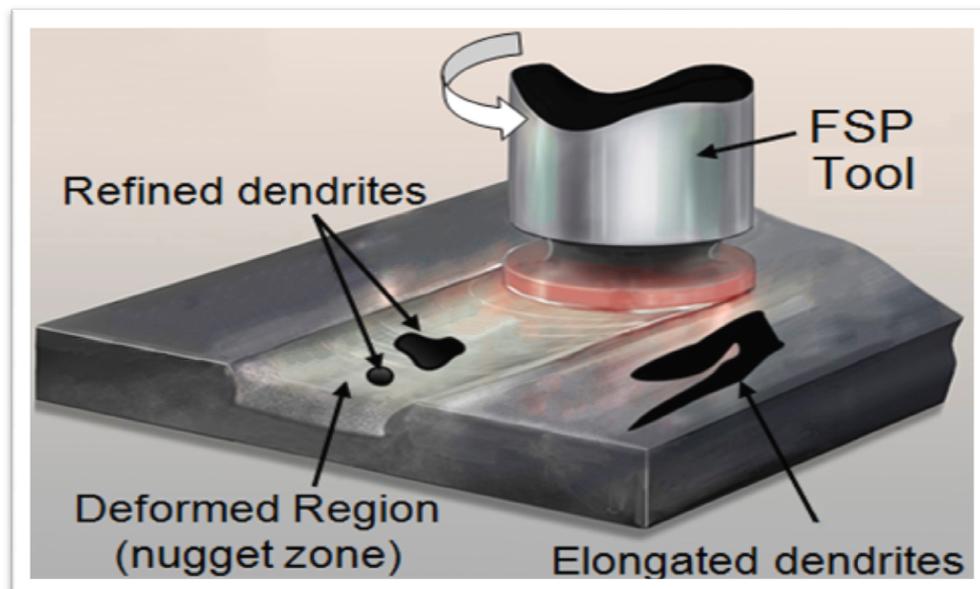


Figure 12: Schéma de traitement par agitation par frottement

III.2. Paramètres du processus de PSF :

Les paramètres qui ont l'influence la plus significative sur le soudage par friction/ le traitement par friction (FSW/ FSP) et affectent considérablement l'apport de chaleur, le flux de matériau, la génération de chaleur, la température de pointe et la qualité de surface finale comprennent la vitesse de déplacement, la vitesse de rotation, la force axiale, et l'angle d'inclinaison, comme indiqué à la référence [86].

La production de chaleur pendant FSW/ FSP se produit principalement en raison du frottement entre l'outil et le matériau de la pièce. Ce frottement est directement influencé par la zone de contact et la pression à l'interface entre l'épaulement de l'outil et la surface de la pièce, qui est contrôlée par la force axiale. En raison du mouvement de rotation et de translation de l'outil, le matériau entourant la broche subit un chauffage localisé et un ramollissement ultérieur, lui permettant de se déplacer autour de la broche.

En plus de la chaleur générée par le frottement, le matériau subit également une forte déformation plastique [63]. Des études ont démontré que la force axiale augmente la production de chaleur, réduit la densité des isothermes et élargit la zone affectée par la chaleur (ZAT) [87].

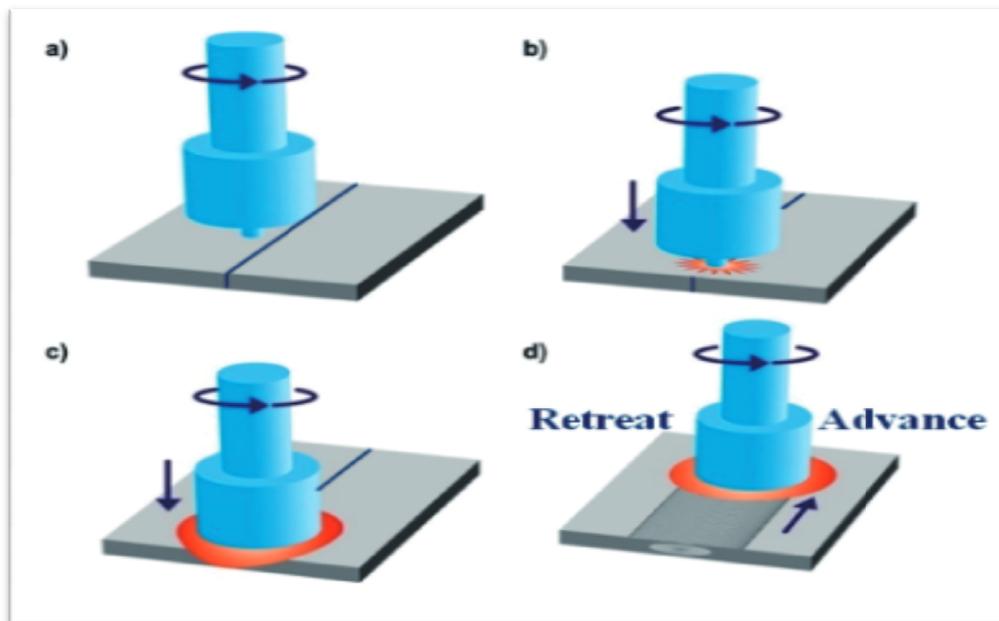


Figure 13: Schéma du FSP, montrant l'outil rotatif non somable en (a), le chauffage par frottement en plongeant dans la pièce en (b), le chauffage par frottement et adiabatique en (c) et le déplacement de l'outil pour souder/ traiter la pièce en (d)

III.2.1. Force axiale :

La force axiale, telle que définie dans la référence, se réfère à la force vers le bas appliquée à la pièce à travers l'outil. L'augmentation de la force axiale a un impact direct sur la qualité de la surface en améliorant la dureté et

les propriétés mécaniques dans la zone agitée. Il est crucial de maintenir la cohérence de la force axiale pour assurer la production de microstructures de haute qualité, soulignant l'importance capitale du contrôle de la force [89].

III.2.2. Vitesse de rotation et de déplacement :

Vitesse de rotation (ω), mesurée en rotations par minute (rpm) dans le sens des aiguilles d'une montre ou dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en fonction de la géométrie de l'outil, de la vitesse de déplacement ou de la vitesse de translation (v), mesurée en millimètres par minute (mm/min), sont les principaux paramètres qui influencent de manière significative le processus d'agitation du matériau dans FSW/ FSP. L'agitation du matériau commence par le mouvement de rotation de l'outil, se poursuit par une combinaison de mouvements de rotation et de translation, et se termine par un mouvement de rotation pur tant que l'outil et l'échantillon restent en contact.

La recherche a démontré une augmentation substantielle de la température générée avec une augmentation de la vitesse de rotation . De plus, lorsque la vitesse de rotation reste constante, la diminution de la vitesse de translation entraîne une augmentation de la température moyenne de soudage [31]. [32] ont mené des expériences avec une vitesse de rotation fixe à 1600 tr/min et des vitesses de déplacement de 0,37, 0,76 et 1,25 mm/s, concluant que les meilleures propriétés de traction ont été obtenues à une vitesse de 0,76 mm/s. [12] ont examiné diverses vitesses de rotation (800, 1000, 1200, 1400 et 1600 tr/min) et de déplacement (20, 40, 60, 80 et 100 mm/min) dans la fabrication de composites de surface à l'aide de FSP. Ils ont constaté que la zone de la zone d'agitation transversale augmentait avec des vitesses de rotation plus élevées (pour une vitesse de rotation fixe) mais diminuait avec l'augmentation de la vitesse de rotation (pour une vitesse de rotation fixe).

De plus, ils ont étudié la relation entre la zone agitée et la taille de la rainure, révélant que la zone de la zone d'agitation diminuait à mesure que la largeur de la rainure augmentait. [11] a fabriqué un composite de surface avec une matrice Al 7075 et des renforts en poudre B4C. Leurs résultats ont indiqué que des vitesses de traversée plus basses ont entraîné une meilleure répartition de la poudre, une dureté plus élevée, une microstructure plus fine et une résistance à l'usure accrue. Une autre étude, avec une vitesse de rotation fixe et une vitesse de rotation variable, a observé que la diminution de la vitesse de rotation entraînait une augmentation de la dureté, tandis que des vitesses de rotation plus élevées offraient une meilleure uniformité de la microdureté. , une résistance à la traction élevée a été obtenue à des vitesses de rotation inférieures de 900 et 1200 tours par minute, combinées à une vitesse de rotation moyenne de 15 mm/min.

Cependant, l'augmentation de la vitesse de rotation a causé des défauts dans le composite, en particulier à des vitesses de rotation plus élevées. La méthodologie de surface de réponse employée (RSM) pour l'optimisation du processus et a suggéré une vitesse de rotation optimale de 1200 rpm et une vitesse de course de 40 mm/ min, résultant en meilleures propriétés mécaniques pour le composite. Lors de l'utilisation d'autres renforts tels que MWNT, une plage de vitesse de rotation plus élevée de 1500 à 2000 rpm a amélioré la distribution MWNT dans la matrice Al 7075. En fin de compte, la gamme optimale de vitesses dépend fortement du matériau du substrat et du type de renfort utilisé[89].

III.2.3. Angle d'inclinaison :

L'angle d'inclinaison de l'outil (α), défini comme l'angle entre l'axe de l'outil et la direction de traitement/ soudage, est un paramètre de processus important dans FSW et FSP. Son but est de s'assurer que l'outil maintient efficacement le matériau de base sous l'épaulement de l'outil, ce qui lui permet de se déplacer efficacement autour de la broche pendant le soudage ou les modifications.

En règle générale, les angles d'inclinaison entre 0° et 3° sont choisis [3,5]. Dialami et al. [33] ont mené des expériences pour tester deux angles d'inclinaison (0° et $2,5^\circ$) et ont conclu que l'angle d'inclinaison de l'outil a un impact sur l'augmentation de la contrainte à l'intérieur du bord d'attaque de l'outil sur la pièce, ainsi que sur l'élévation de la température dans la zone voisine de l'outil FSW sur le côté avant arrière. Ils ont également observé que les changements de l'angle d'inclinaison peuvent réduire la contrainte d'écoulement du matériau sur le côté avant arrière, favoriser l'écoulement du matériau derrière l'outil et améliorer l'action d'agitation du matériau au bord de fuite du côté avant. De plus, l'angle d'inclinaison affecte directement la profondeur de plongée de l'outil.

III.2.4. Profondeur d'insertion :

La détermination de la "profondeur d'insertion" appropriée dans FSP dépend principalement de la longueur de la sonde et peut avoir un impact significatif sur la qualité des surfaces résultantes. [9] a mené une étude pour étudier l'influence de la profondeur d'insertion de l'outil FSP sur la qualité d'un composite nouvellement formé. Le matériau de renfort utilisé était de la poudre de SiC, qui était distribuée dans une plaque matricielle Al AA6061-T6 mesurant 5 mm x 60 mm x 200 mm.

La poudre a été insérée dans une rainure d'une profondeur et d'une largeur de 2 mm. La rainure a été fermée à l'aide d'un outil sans goupille en acier H13. Les paramètres du procédé FSP utilisés étaient un angle d'inclinaison de l'outil de

2,5°, une vitesse de déplacement de 40 mm/min et une vitesse de rotation de l'outil de 1400 tr/min. Il a été observé qu'une faible profondeur de plongée entraînait un débit de matière limité et la formation de cavités au centre de la zone agitée. Cela est dû à la faible production de chaleur résultant de la petite zone de contact entre l'épaulement de l'outil et la pièce.

Les auteurs ont proposé une profondeur de plongée optimale de 0,25 mm (avec un diamètre d'épaulement de 20 mm). Si la profondeur de pénétration dépassait la valeur optimale, des problèmes tels que le collage de l'épaulement de la pièce, l'éjection de la poudre de renfort, l'amincissement de la pièce et même des dommages importants se produisaient.

III.2.5.Géométrie de l'outil :

La géométrie des broches de l'outil FSW/FSP est un facteur important dans le processus FSW/FSP. Il existe diverses variantes de goupille d'outil, les plus courantes étant la goupille inférieure ronde conique, la goupille cylindrique (cylindrique), la goupille cylindrique fileté, la goupille cylindrique fileté avec des cannelures, la goupille triangulaire et la goupille carrée [2,4,32,34].

Les profilés filetés cylindriques, triangulaires et carrés sont couramment appliqués selon la littérature. Les sondes sans filetage sont particulièrement adaptées au traitement des alliages plus durs ou des composites à matrice métallique, car les caractéristiques filetées ont tendance à s'user plus facilement. De plus, les surfaces extérieures de la sonde peuvent comporter des cannelures ou des combinaisons de cannelures et de fils [2].

Certains profils de broches facilitent également une approche de traitement de type impulsion. Les outils avec un nombre plus élevé de surfaces planes ont tendance à présenter un principe de travail plus pulsatoire, ce qui entraîne une granulométrie plus fine. Les fils et les cannelures peuvent améliorer davantage l'apport de chaleur dans le matériau par rapport aux outils à surface plane, car ils favorisent un meilleur mélange des matériaux grâce à une agitation améliorée.

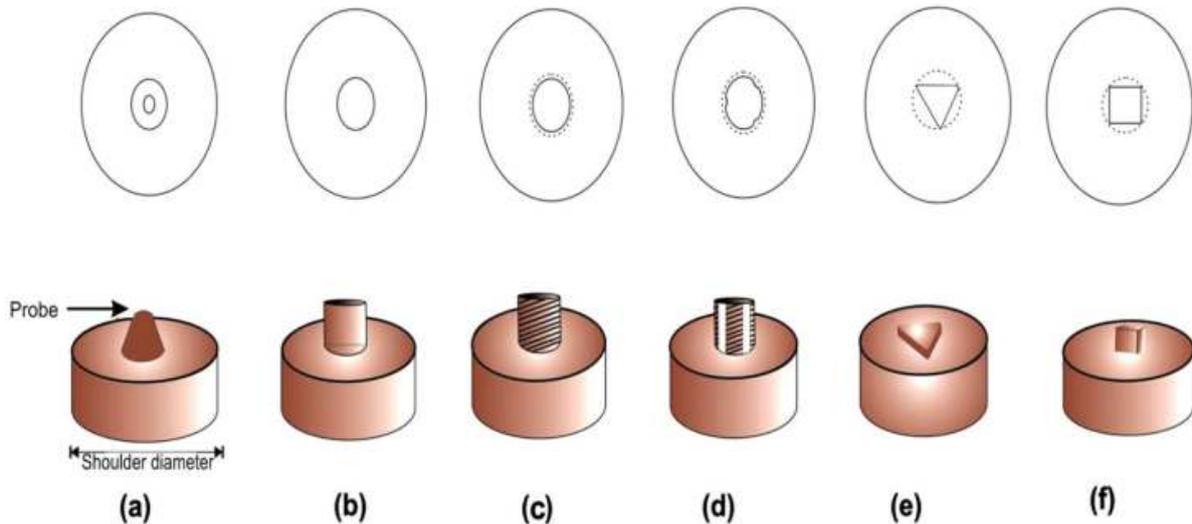


Figure 14: Profile de sondes à outils FSP coniques, b cylindriques, c cylindriques filetées, d futes cylindriques filetées, e triangulaires, f carrées [33]

Diverses géométries de goupilles d'outils, y compris des profils droits, coniques (coniques), filetés cylindriques, carrés et triangulaires, ont été comparés [32]. Ils ont constaté que le profil de la goupille carrée présentait des zones exemptes de défauts, indépendamment des vitesses de soudage.

De plus, ils ont conclu que la vitesse de soudage optimale, indépendamment du profil de la broche, combinée au meilleur profil de broche, indépendamment des vitesses de soudage, entraînait une résistance à la traction maximale, une dureté maximale et une structure de grain plus fine. En ce qui concerne la fabrication de composites de surface à l'aide de FSP, il a été observé que l'outil à goupille carrée permettait la dispersion la plus uniforme des particules de renforcement dans toute la matrice par rapport aux profils cylindriques (filetés et non filetés) et triangulaires [34].

De plus, le profil carré des broches a donné la structure du grain le plus fin. Cependant, il convient de noter que l'outil carré présentait les taux d'usure les plus élevés, entraînant le dépôt de débris de fer dans la matrice d'aluminium. a comparé l'effet de différents profils de goupille d'outil sur la distribution de particules dans le composite de surface AZ31/Al₂O₃. Ils ont conclu que la sonde cylindrique filetée n'entraînait aucun défaut par rapport à la sonde cylindrique non filetée et cannelée, en raison d'un meilleur écoulement et d'un meilleur brassage du matériau.

III.2.6. NOMBRE DE LAISSEZ-PASSER :

A mené une étude sur le composite Al/Al₂O₃ en utilisant le FSP à passage unique et a constaté que la non-uniformité du composite était plus prononcée en termes de structure du grain, de propriétés de traction et de distribution des particules.

Cependant, avec la deuxième passe, un niveau d'homogénéité plus élevé a été atteint. [13] a obtenu une répartition relativement uniforme du TiB₂ en effectuant quatre passes. [14] ont étudié les processus de PSF à un et deux passages et ont constaté que deux passages donnaient de meilleurs résultats en termes de dureté et de résistance à l'usure comparativement à un seul passage. [16] a examiné l'influence du FSP multi-passes sur le composite AA5803/ZrO₂ et a découvert que l'augmentation du nombre de passes améliorait constamment les propriétés de traction tout en réduisant le taux d'usure.

Cependant, le coefficient de frottement était plus élevé dans le cas du FSP à huit passes par rapport au matériau de substrat. [17] ont évalué les effets du PSF à plusieurs passages sur le composite de surface AA2024/Al₂O₃ et ont obtenu des résultats similaires, obtenant une augmentation de 40 % de la dureté de surface grâce au raffinage du grain. Il a également été conclu qu'un seul passage est insuffisant pour former un composite de surface, ce qui correspond aux résultats rapportés dans d'autres publications [20].

Dans le procédé FSW, l'augmentation du nombre de passes (remblayage) améliore les caractéristiques mécaniques du joint de soudure [36]. Cependant, il est important de noter qu'un nombre plus élevé de passages peut entraîner une déformation accrue due à des apports de chaleur plus élevés.

III.2. Avantage de la méthode FSP :

La méthode FSP offre plusieurs avantages dans le traitement des matériaux. Voici quelques-uns des principaux avantages :

- **Raffinement microstructural** : FSP permet le raffinement de la microstructure du matériau, conduisant à des propriétés mécaniques améliorées. L'action d'agitation de l'outil FSP décompose les gros grains en grains plus petits et plus uniformes, ce qui améliore la résistance, la dureté et la durabilité. [49]
- **Densification et homogénéité** : FSP favorise la densification du matériau, réduisant la porosité et améliorant sa densité globale. De plus, il aide à obtenir une répartition homogène des éléments d'alliage, ce qui permet d'obtenir des propriétés cohérentes dans tout le matériau traité.

- **Élimination des défauts de porosité et de coulée :** Contrairement aux voies métallurgiques liquides traditionnelles, FSP évite la formation de porosité et de défauts de coulée. La nature solide du FSP empêche l'emprisonnement de gaz et d'impuretés qui conduisent souvent à des défauts dans les composants moulés.
- **Simplicité et rentabilité :** FSP offre une alternative plus simple et plus rentable aux méthodes de traitement conventionnelles. Il élimine le besoin de fusion et de coulée, réduisant la consommation d'énergie et les coûts associés. De plus, il évite les complexités de la conception et de l'entretien des moules.
- **Propriétés des matériaux sur mesure : FSP permet un contrôle précis des propriétés des matériaux. En ajustant les paramètres FSP tels que la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse de déplacement et la pression appliquée, la microstructure, la résistance mécanique et d'autres propriétés peuvent être adaptées aux exigences spécifiques.**
- **Polyvalence et flexibilité :** FSP est applicable à une large gamme de matériaux, y compris les métaux, les alliages et les composites. Il peut être utilisé pour modifier des matériaux existants, réparer des composants endommagés ou créer de nouvelles structures avec les propriétés souhaitées. La polyvalence et la flexibilité de FSP le rendent approprié à diverses industries, y compris l'aérospatiale, l'automobile, et la fabrication.

III.3. Application de la technique FSP :

L'incorporation de métaux ou d'alliages supplémentaires pour soutenir et améliorer le matériau primaire s'est avérée être une approche bénéfique, en particulier dans les industries automobiles, des armures, de la défense et de l'aérospatiale. Cette méthode permet l'établissement de nouveaux matériaux avec une résistance à l'usure, une résistance au fluage et des propriétés de fatigue améliorées [51].

Plusieurs exemples réussis de composites développés en utilisant la technique FSP comprennent des combinaisons telles que AA 6082/acier inoxydable, AA 6082/TiC, AA 6063/SiO₂, Al5083/Ni, Al 5083/Ti et AA 7075/TiB₂ [51]. Ces matériaux composites, obtenus par FSP, démontrent l'efficacité de cette technique dans la création de matériaux personnalisés avec des caractéristiques améliorées pour diverses applications.

Chapitre 04 :

Partie expérimentale

IV. Introduction :

Notre but est de réaliser une synthèse de la phase MAX Cr₂AlC sans avoir recours à une protection sous gaz d'argon. Nous avons examiné une nouvelle méthode expérimentale que les chercheurs ont découverte en utilisant des sels appelés KClNaCl et leur eutectique (NaCl_KCl) en 2019, Dash et al.

IV.1. Elaboration :

Les échantillons seront fabriqués en poudre en fonction de leur forme finale, la méthode utilisée sera un four à moufle dans une atmosphère à l'air libre. Afin d'éviter l'oxydation des poudres (produits initiaux), nous allons : - Modifier la phase MAX Cr₂AlC en utilisant les sels suivants KCl et NaCl, ainsi que leur eutectique (NaCl_KCl), à différentes températures et temps au laboratoire LERTI de l'Université de Bida 1).

IV.2. Modeopérateur:

Les caractéristiques de poudres utilisées pour la synthèse de la phase MAX Cr₂AlC sont regroupées dans le tableau suivant :

Elément	Taille de la poudre	Marque	Pureté
Cr	400mesh	BIOCHEM	99.0%
Al	25microns	BIOCHEM	98.0%
C	2microns	PROLABO	99.99%

Tableau 6: Conditions tribologiques utilisés pour les trois systèmes composites.

IV.3. Poudres utilisés :

Le mélange de poudres utilisées pour la synthèse de la Phase MAX est le mélange de la poudre suivante: Chrome (Cr), Aluminium (Al) et carbone (C).



Figure 15: Poudres utilisées pour la synthèse du Cr₂AlC.

IV.4. Pesage:

En premier lieu, nous avons effectué un mélange homogène de 5g de poudres ($n_{Cr}=2\text{mol}, n_{Al}=1\text{mol}, n_{C}=1\text{mol}$) afin de créer la phase Cr₂AlC, avec une balance de précision de 0,0001g. Le mélange de poudres pesée est illustré dans la figure ci-dessous:



Figure 16: Balance analytique de précision ADAM.

Une quantité de 5g est ajoutée à la fois avec du KCl et du NaCl, ainsi qu'avec de l'eutectique (NaCl_KCl).

À la fin, on obtient :

- Trois sels sont mélangés avec le Cr₂AlC (KCL, NaCL, KCL_NaCL).

IV.5. Broyage :

Chaque mélange a été broyé à l'aide d'un mortier en agate. Ensuite, on les a renvoyés dans des boîtes et on a ajouté des billes pour assurer une homogénéité optimale des poudres en les agitant. Les poudres ont été homogénéisées pendant 24 heures.

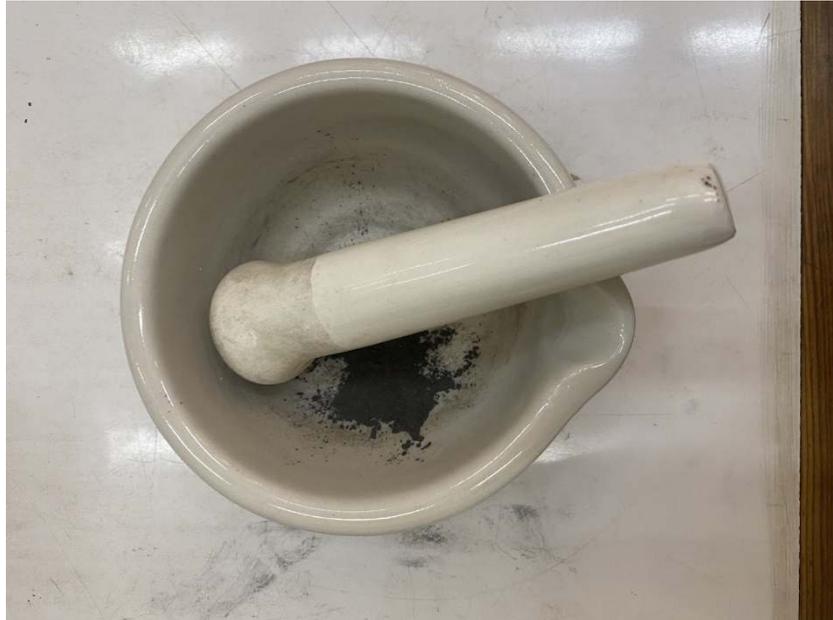


Figure 17: Mortier et pilon.

IV.6. Raffinement des grains:

La méthode implique de placer la poudre dans des boîtes de prélèvement afin de concasser les grains de la poudre de Phase MAX à l'aide de billes en acier au carbone, afin de garantir une homogénéisation des poudres pendant une période de 72 heures.



Figure 18: Poudre homogénéisée.

IV.7 Compactage :

Une fois les poudres mélangées, elles ont été placées dans le dispositif de compactage (représenté sur la figure 5 et 6), avec trois pastilles préparées pour chaque

température et temps, ainsi que chaque sel. La pastilleuse employée est illustrée dans la figure ci-dessous :



Figure 19: La pastilleuse utilisée.



Figure 20: Presse Hydraulique de Marque SPECAC.

IV.8. Le soudage par friction malaxage :

IV.8.1 Choix de matériaux :

Nous avons opté pour un alliage d'aluminium 2024 T3, qui est couramment employé dans le domaine de la construction aéronautique. Cette décision repose sur divers critères tels que la disponibilité des matières premières, etc.

Les alliages industriels d'aluminium 2024-T3 sont principalement employés comme des tôles solides pour les voilures et le fuselage d'avions. Les alliages contiennent principalement des éléments d'addition tels que le Zn, le Mg et le Cu. Ils sont utilisés en raison de leurs qualités mécaniques supérieures.



Figure 21: Tôle d'aluminium 2024.

IV.8.2. Paramètres utilisés :

Le but de l'expérience est de déterminer l'effet du rapport : (vitesse de rotation / vitesse d'avance) et l'effet renforçateur de la céramide ajouté sur les qualités de

Joint. Pour cela, il est clair de fixer d'autres paramètres (l'angle d'inclinaison, le diamètre de la goupille et de l'épaule, la profondeur de l'outil). Paramètre spécial (additif de renforcement céramique) :

Dans cette expérience, le paramètre spécial et l'additif céramique de renforcement, ce processus est effectué en laissant un vide estimé d'environ 2.5 mm dans la plaque à sceller et en ajoutant une poudre constituée de tout chlorure de sodium (eutectique) +Cr₂AlC {additif céramique} de l'intérieur du vide (zone de joint soudé), comme le montre la Fig25.



Figure 22: Estimation du vide entre les plaques.



Figure 23: Addition du renfort en céramiques (eutictique+Cr₂AlC).

IV.8.3. Procédures expérimentales :

Nous avons effectué l'opération de soudage par friction malaxage (FSP) dans l'atelier de fabrication du département mécanique de l'Université SAAD DAHLEB de Blida.

La machine-outil utilisée pour le soudage est illustrée dans la figure. C'est une fraiseuse verticale FU de dimension 250 x 1000 /2. Une broche porte-fraise verticale et inclinable est fournie. On l'utilise pour le surfacage ou pour réaliser des rainures et des contours droits ou circulaires. La réalisation des soudures a eu lieu dans le même atelier.



*Figure 24: Fraiseuse universel 250*1000.*

IV.8.4. Paramètres opératoires du soudage SFM:

*** Déroulement du soudage:**

- Installation d'un outil de soudage sur la machine,
- Couper et nettoyer les feuilles à souder avec de l'alcool puis les polir sur les surfaces et les bords,
- Positionner la tôle de manière à ce que le bord à souder soit parallèle à la progression de la goupille pendant le soudage,
- Vérifier la planéité de la feuille

IV.8.5. Bridage :

Les pièces sont bridées avec un ensemble « fer à cheval » – brides qui fixent la cloche sur l'enclume une vis et une rotule pour le serrage du palier latéral. On bride également la cloche sur le support d'enclume afin d'empêcher la translation de l'enclume dans sa rainure.

Il est nécessaire d'adapter le montage de soudage et le bridage afin de faire face aux efforts de soudage. Ce procédé ressemble à celui utilisé en usinage pour la création des assemblages d'usinage.



Figure 25: Procédure de bridage.

IV.8.6. Prélèvement des échantillons :

Une fois que les plaques d'aluminium ont été soudées, des échantillons sont prélevés afin de vérifier la qualité du joint et de mener des tests mécaniques (Caractérisation métallurgique, Micro-dureté). On a utilisé

différents échantillons pour étudier l'évolution de la microstructure, ainsi que l'impact de la vitesse et de la pénétration.



Figure 26: Des échantillons du 2024-T3 après FSP.

IV.8.7. Découpage de la tôle :

Dans cette opération, on découpe la tôle en quatre parties à l'aide de la cisaille (disponible au niveau de l'atelier du département de mécanique).



Figure 27: Découpage de tôle d'aluminium 2024.

IV.8.8. Polissage des échantillons :

Après cela, nous avons procédé à la politure afin d'obtenir une surface lisse et achevée en utilisant du papier abrasif p280, p400, p600, p800, p1200, p1500, p2000. Nous modifions le papier abrasif lorsque toutes les scratches se trouvent dans une même direction, puis nous modifions l'orientation de l'échantillon et utilisons le prochain papier abrasif.

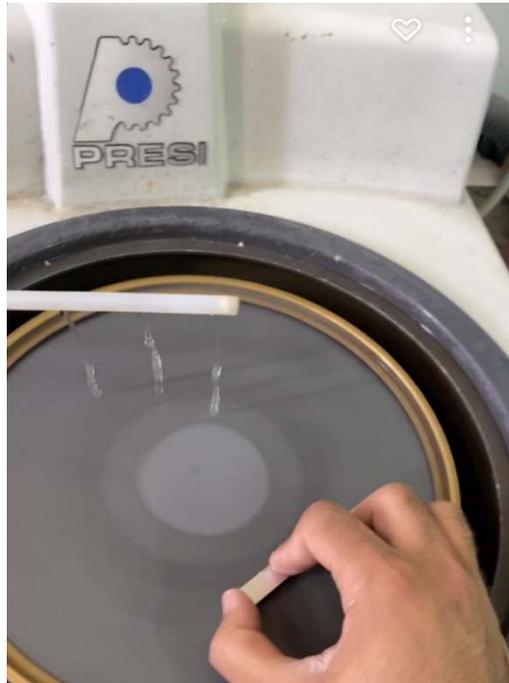


Figure 28: Polissage de l'échantillon.

Après le polissage de finition a été réalisé avec la pâte diamanté sur un papier feutre afin d'avoir une surface à l'état miroir.

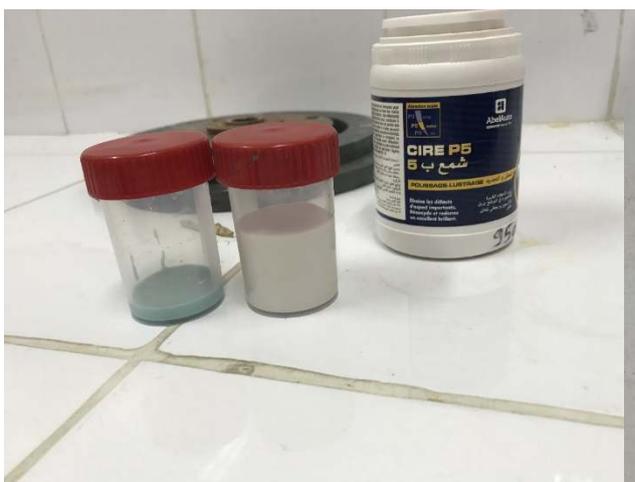


Figure 29: La Pâte diamante



Figure 30: L'échantillon polisse.

IV.8.9. Traitement Thermique :

Afin de préparer des échantillons comprenant de l'urea et du Cr₂AlC, ainsi qu'un autre comme référence pour l'essai de résistance et un tribomètre, nous avons souhaité expérimenter en modifiant leurs caractéristiques.

La première étape consiste à placer les trois échantillons dans l'oven à une température de 530 °C pendant une 2heure, puis à les réchauffer rapidement dans de l'eau dans un récipient, puis à les repositionner dans l'oven à 180 °C pendant 8 heures (traitement thermique).



Figure 31: Le four utilisé



Figure 32: Le récipient.



Figure 33: L'échantillon après le traitement.

Après on a répété le polissage avec la même méthode.

IV.8.10. Test de micro-dureté :

Après la préparation des échantillons, l'un des principaux prérequis pour l'utilisation du Micro dureté était que l'échantillon soit plat (pour la sécurité du pénétrateur, qui est un matériau en diamant) et qu'il soit frotté avec de l'acétone pour le nettoyer. Après avoir recueilli les points et utilisé le programme Origin, nous représentons l'évolution de la résistance de l'aluminium avant et après l'épreuve thermique.



Figure 34: Le duromètre

IV.8.11. Le teste de tribologie :

Nous n'avons testé les échantillons, un en tant que témoin et non traite et traite thermiquement. Nous avons préparé l'échantillon pour le test tribologique, mais cette fois le contact entre la bille et l'aluminium était sans lubrifiant. Le test commence en même temps. Il enregistre les données de ce test pour dessiner le graphique de frottement en termes de temps.

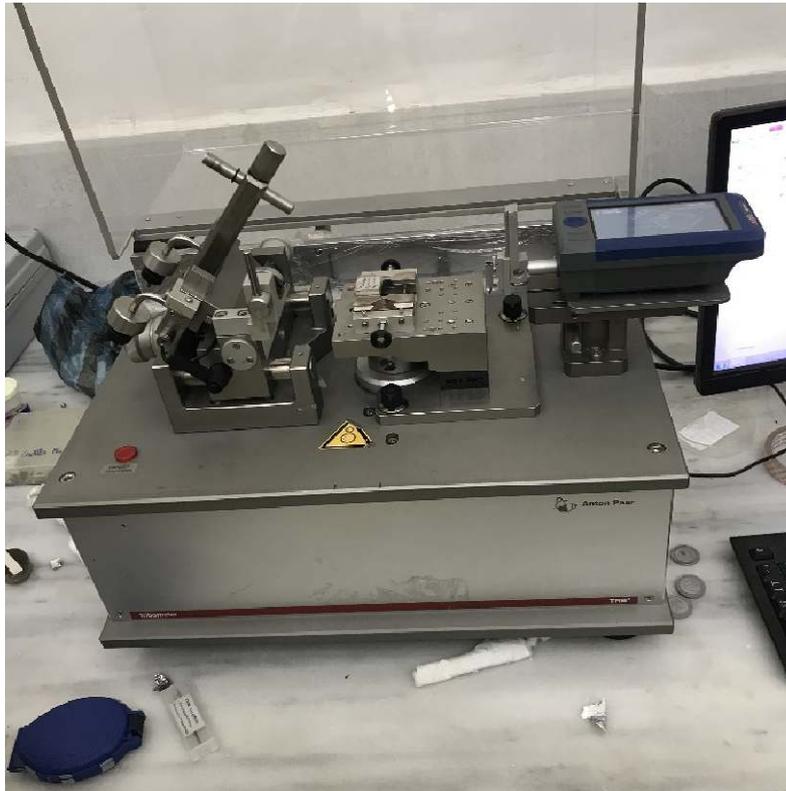


Figure 35: Le tribomètre

IV.8.12. Profilomètre :

Nous récupérons l'échantillon pour le tester avec profilomètre pour rendre les données de sortie valides représentées par un graphique, ce graphique est importé dans un programme appelé "Getdata Graph Digitizer", puis les données traitées avec le programme sont importées dans un autre programme appelé "Origin" qui nous donne un graphique de la courbe d'usure.



Figure 36: Profilomètre.

IV.8.13. Microstructure :

Dans un nettoyeur à ultrasons, nous plongeons l'échantillon dans de l'acétone pour le nettoyer, puis nous le séchons avec un séchoir pour le tester au microscope optique. Nous utilisons une échelle de 100 μm pour trouver la marque d'usure et la mesurer.



Figure 37: Un microscope optique.

Chapitre 05 :

Interprétation et Résultats

V. INTRODACTION:

Dans ce dernier chapitre, nous aborderons les résultats obtenus lors des différentes techniques expérimentales utilisées dans notre étude (tribologie, profilomètre, microdureté, etc.) et fournira des interprétations pertinentes concernant l'usure, les marques d'usure et la microdureté.

V.1. Microstructure :

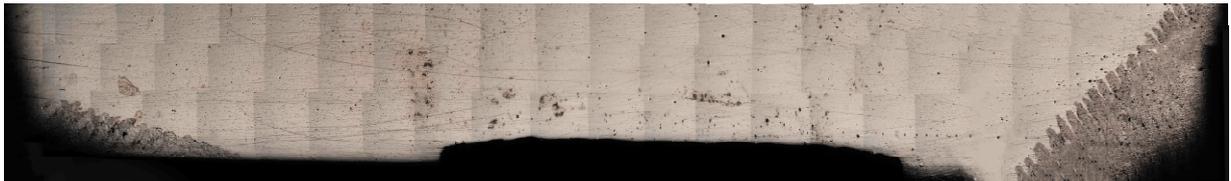


Figure 38: Image d'inkscape présentant le résultat du microscope optique montrant le FSP d'échantillon non traite.



Figure 39: Image d'inkscape présente le résultat du microscope optique montrant le FSP d'échantillon HOT traitement.

On observe il Ya migration des particules a joints de grains et creation des pores et des fissures au niveau de joint de grain

On a des réactions se sont produites aux joints de grains entre Al_2O_3 et Cr, provoquant leur épuisement de la matrice Al. Curieusement, le mode de précipitation dans la zone affectée thermiquement de la matrice s'est également transformé en précipitation à la limite des grains.

V.2. Micro-dureté :

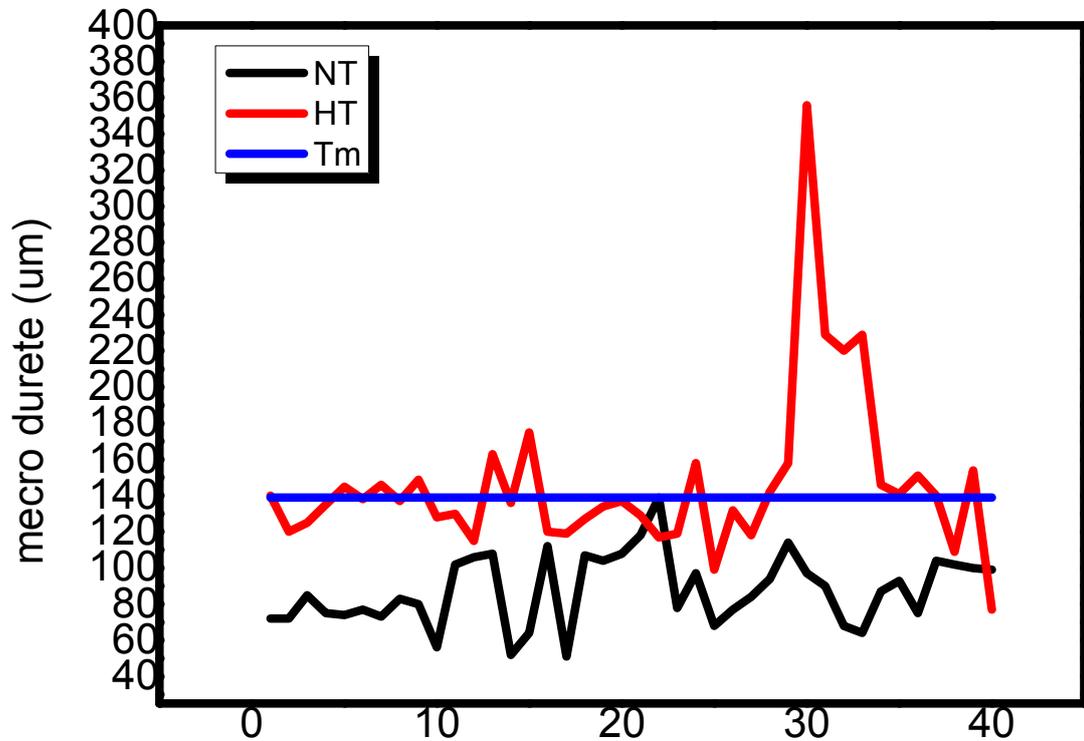


Figure 40: La variation de dureté change dans chacun de ces échantillons témoin et non traité thermiquement et traité thermiquement Al2024 530 °.

On observe que la micro dureté augmenté persque la phase max a décomposer, et la micro dureté a diminué à cause de création des pores

Cette augmentation est probablement due à la décomposition de la granulométrie du composite Al 2024 avec Cr₂AlC due au FSP et au nombre de passages de FSP

V.3. Tribologie

Les coefficients de frottement des échantillons sont représentés sur les figures suivantes:

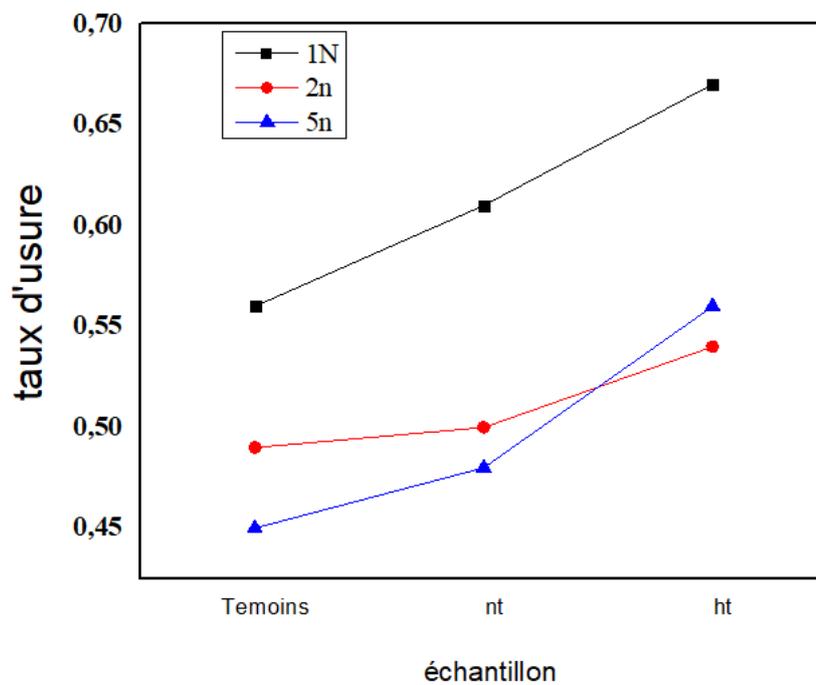
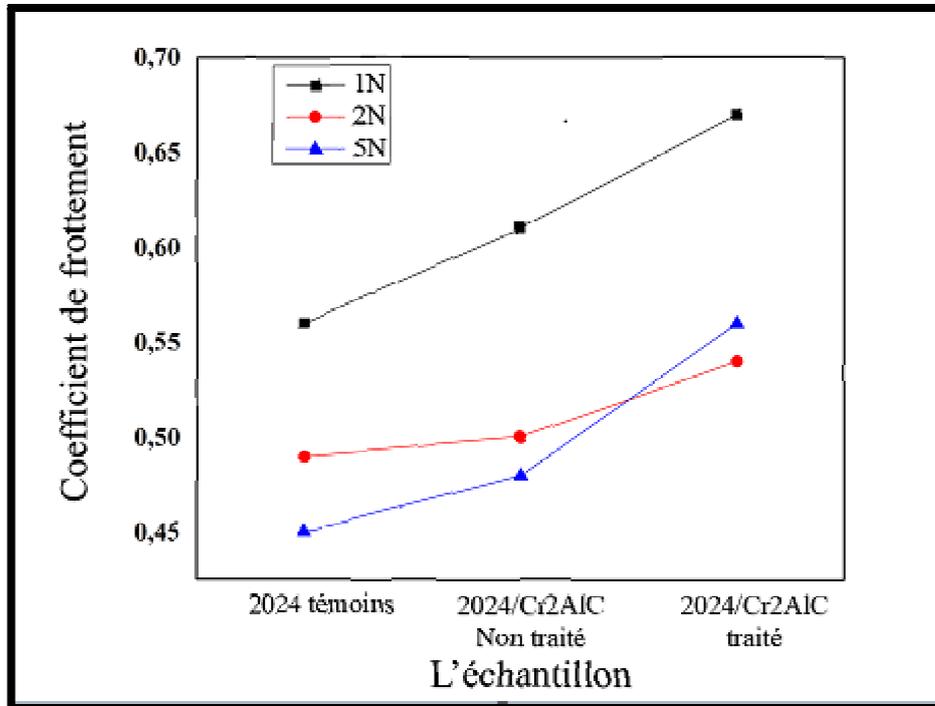


Figure 41: variation coefficient de frottement.

Pour calculer le taux d'usure, nous avons appliqué la loi ci-dessous :

$$WR = \frac{2 \pi R S}{F d} = \text{mm}^3/\text{Nm}$$

S : surface R : le rayon F : la charge (N) d : la distance (m)

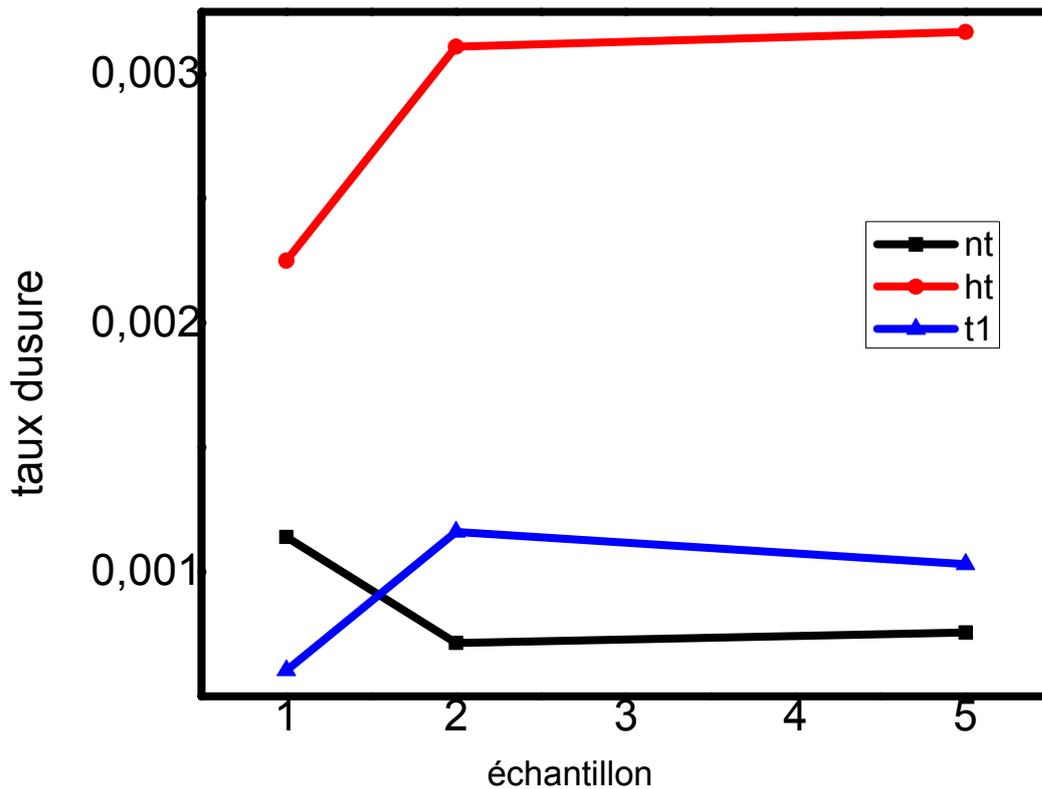


Figure 42: Représente le taux d'usure.

V.4. Test de profilomètre :

Regarde les graphes suivants :

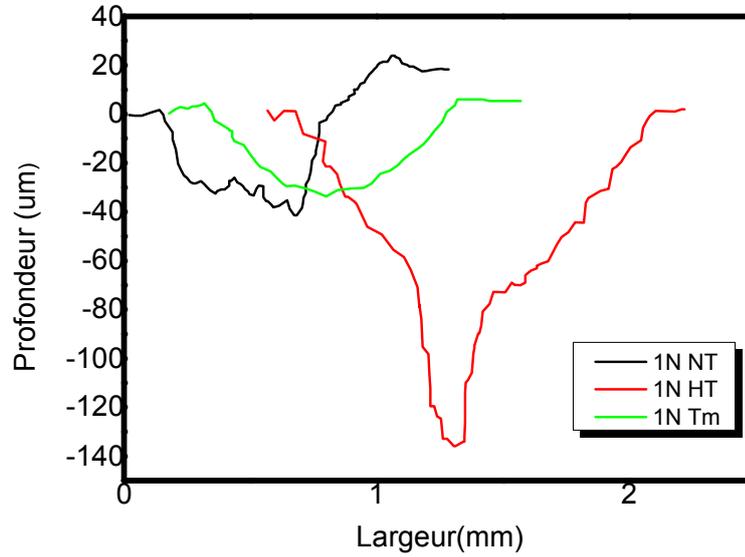
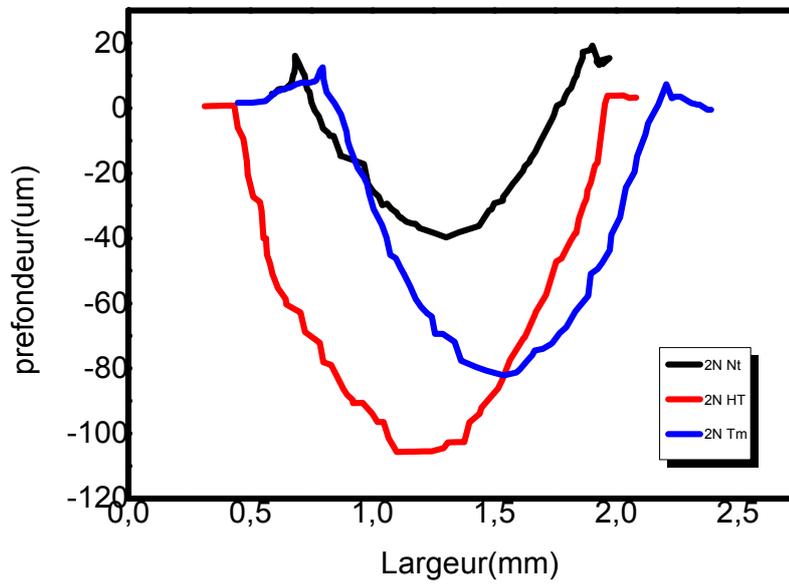


Figure 43: Trace of wear for worn surfaces.



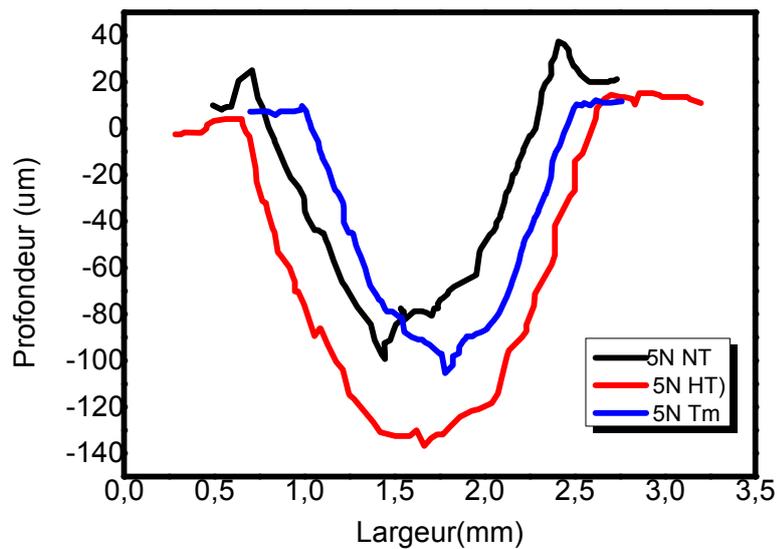


Figure 44: Trace of wear for worn surfaces.

On observe que la balle entre en contact avec la surface, elle exerce une pression, ce qui fait que la balle pénètre dans la surface et se déplace selon une trajectoire linière. Ce phénomène est appelé "rodage" et entraîne une friction accrue entre la balle et la surface.

Lors de ce contact, deux types de mécanismes d'usure ont lieu. La première est l'usure de l'adhésif, qui se produit lorsque la balle frotte contre la surface, générant des particules qui forment une poudre. Cette poudre est constituée de particules érodées de la surface. Le deuxième mécanisme est l'usure abrasive, facilitée par le mouvement de ces particules de poudre. La poudre se dépose sur la surface de l'échantillon, entraînant un transfert de matière entre la bille et l'échantillon.

Conclusion

CONCLUSION :

L'objectif de cette étude est d'analyser la compréhension du procédé FSP utilisé dans l'aluminium 2024.

Les principales observations de cette étude sont :

- Le nombre de cycles de FSP augmente l'homogénéisation de la phase max (Cr_2AlC) avec l'al2024
- Lorsque les vitesses sont différentes, on observe une irrégularité de la taille des grains dans le noyau
- On observe qu'au début il y a migration de joints de grains. Que fait des fissures et des pores ;
- Il a été observé qu'il y a une création de pores immédiatement après le refroidissement
- La dureté d'usure de l'aluminium traité FSP est supérieure à celle de l'aluminium FSP non traité
- Il n'y a pas de craques et de vides, puis il n'y a pas de défauts dans le FSP

Références

- [1] Y.C.Chim,X.Z.Ding,X.T. Zeng,andS.Zhang,“OxidationresistanceofTiN, CrN, TiAlN and CrAlN coatings deposited by lateral rotating cathode arc,” *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 17, pp. 4845–4849, 2009.
- [2] S.K.KhraisandY.J.Lin,“WearmechanismsandtoolperformanceofTiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 4140 steel,” *Wear*, vol. 262, no. 1, pp.64–69, 2007.
- [3] S.Kota,M.Sokol,andM.W.Barsoum,“AprogressreportontheMABphases: atomically laminated, ternary transition metal borides,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 0, no.0, pp. 1–30, 2019.
- [4] “OxidationandReactivitywithOtherGases,” *MAXPhases*.pp.187–235,25- Sep-2013.
- [5] S. Kota, Y. Chen, J. Wang, S. J. May, M. Radovic, and M. W. Barsoum, “SynthesisandcharacterizationoftheatomiclaminatedMn₂AlB₂,”*J.Eur.Ceram. Soc.*, vol. 38, no. 16, pp. 5333–5340, 2018.
- [6] Y.Zhou,H.Xiang,F.-Z.Dai,andZ.Feng,“Electricalconductiveanddamagetolerantnanolaminated MAB phases Cr₂AlB₂, Cr₃AlB₄ and Cr₄AlB₆,” *Mater. Res.Lett.*,vol. 5,no.6, pp.440–448,Nov. 2017.
- [7] W.Jeitschko,“DieKristallstrukturvonMoAlB,”*MonatsheftfürChemieund verwandteTeileandererWissenschaften*, vol. 97, no. 5, pp. 1472–1476, 1966.
- [8] S.Okada*et al.*,“SingleCrystalGrowthof(MoXCr_{1–X})AlBand(MoXW_{1–X})AlB
- [9] F.-Z.Dai,Z.Feng,andY.Zhou,“First-principlesinvestigationonthechemical bonding, elastic properties and ideal strengths of MoAlB and WAlBnanolaminated MAB phases,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 147, pp. 331–337, 2018.
- [10]M.AdeandH.Hillebrecht,“TernaryBoridesCr₂AlB₂,Cr₃AlB₄,andCr₄AlB₆: The First Members of the Series (CrB₂)_nCrAl with n = 1, 2, 3 and a Unifying Concept for Ternary Borides as MAB-Phases,” *Inorg. Chem.*, vol. 54, no. 13, pp. 6122–6135, Jul. 2015. byMetalAlSolutionsandPropertiesoftheCrystals,”*J.SolidStateChem.*,vol. 133, no. 1, pp. 36–43, 1997.
- [11]H.Zhang, F.Dai,H. Xiang, Z.Zhang,and Y.Zhou,“CrystalstructureofCr₄AlB₄: AnewMABphasecompounddiscoveredinCr-Al-Bsystem,”*J.Mater.Sci. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 530–534, 2019.
- [12]Y.Zhou,H.Xiang,F.-Z.Dai,andZ.Feng,“Y₅Si₂B₈:Atheoreticallypredicted new damage-tolerant MAB phase with layered crystal structure,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 101, no. 6, pp. 2459–2470, Jun. 2018.

- [13] M.W. Barsoum, *MAX Phases: Properties of machinable ternary carbides and nitrides*. 2013.
- [14] M.W. Barsoum, "Thermal Properties," *MAX Phases*. pp.107–153, 25-Sep-2013. pp.307–361, 25-Sep-2013.
- [15] M.W. Barsoum, "Dislocations, Kinking Nonlinear Elasticity, and Damping," *MAX Phases*. pp. 271–305, 25-Sep-2013.
- [16] M.W. Barsoum, A. Murugaiah, S.R. Kalidindi, T. Zhen, and Y. Gogotsi, "Kink bands, nonlinear elasticity and nanoindentations in graphite," *Carbon N. Y.*, vol. 42, no. 8–9, pp. 1435–1445, 2004.
- [17] S. Kota *et al.*, "Synthesis and Characterization of an Alumina Forming Nanolaminated Boride: MoAlB," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 26475, 2016.
- [18] M.W. Barsoum, N. Tzenov, A. Procopio, and M. Ali, "Oxidation of Tin + 1AlX_n (n=1–3 and X=C, N) II. Experimental Results," *J. Electrochem. Soc.*, pp. c551–c562, 2001.
- [19] W. Jeitschko, H. Nowotny, and F. Benesovsky, "Carbides of formula T₂MC," *J. Less Common Met.*, vol. 7, no. 2, pp. 133–138, 1964.
- [20] Sundberg, M., Malmqvist, G., Magnusson, A., and El-Raghy, T. "Alumina forming high temperature silicides and carbides". *Ceram. Int.*, 30, 1899-1904 (2004).
- [21] A.C. Ferreira Magalhães, *Thermoelectric Measurements for Temperature Control of Robotic Friction Stir Welding*, PhD thesis, University West, Trollhättan, Sweden, 2020.
- [22] S. Bharti, N.D. Ghetiya, K.M. Patel, A review on manufacturing the surface composites by friction stir processing, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 36, iss. 2, pp. 135–170, 2021, doi: 10.1080/10426914.2020.1813897
- [23] P. Upadhyay, A.P. Reynolds, *Effects of thermal boundary conditions in friction stir welded AA7050-T7 sheets*, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, iss. 6, pp. 1537–1543, 2010, doi: 10.1016/j.msea.2009.10.039
- [24] a *Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Sestre Janjic 6, 34000 Kragujevac, Serbia*, b *IMW Institute, Aleja Milanovic bb, 34325 Luznice, Serbia*, c *AMM Manufacturing, Aleja Milanovic bb, 34325, Luznice, Serbia*.
- [25] S.W. Bailey, R.B. Langston, Anauxite and kaolinite structures identical, *Clay Clay Miner.* 17 (1969) 241–243.
- [26] D.M.M. Krishantha, R.M.G. Rajapakse, D.T.B. Tennakoon, H.V.R. Dias, AC impedance analysis of polyaniline–montmorillonite nanocomposites, *Ionics* 12.

- [27] S.A. Carroll-Webb, J.V. Walther, A surface complex reaction model for the pH-dependence of corundum and kaolinite dissolution rates, *Geochim. Cosmochim. Acta* 52 (1988) 2609–2623
- [28] and near-infrared study, *Spectrochim. Acta A* 77 (2010) 856–861.
- [29] H. Cheng, J. Yang, Q. Liu, J. He, R.L. Frost, Thermogravimetric analysis-mass
- [30] Emission spectroscopic study of halloysite-potassium acetate intercalation compound, *Thermochim. Acta* 511 (2010) 124–128.
- [31] H. Cheng, J. Yang, Q. Liu, J. Zhang, R.L. Frost, A spectroscopic comparison of selected Chinese kaolinite, coal bearing kaolinite and halloysite—a mid-infrared
- [32] C. Ma, R.A. Eggleton, Surface layer types of kaolinite: a high-resolution transmission electron microscope study, *Clay Clay Miner.* 47 (1999) 181–191.
- [33] R. Duarte-Silva, M.A. Villa-García, M. Rendueles, M. Díaz, Structural, textural
- [34] H. Cheng, Q. Liu, J. Yang, J. Zhang, R.L. Frost, Thermal analysis and infrared spectrometry (TG-MS) of selected Chinese kaolinites, *Thermochim. Acta* 507–
- [35] K. Sakurai, A. Teshima, K. Kyuma, Changes in zero point of charge (ZPC), specific surface area (SSA), and cation exchange capacity (CEC) of kaolinite and [20].
- [36] C. Appel, L.Q. Ma, R.D. Rhue, E. Kennelley, Point of zero charge determination mobility, *Geoderma* 113 (2003) 77–93.