

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCINTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANOQUE

**Laboratoire d'études et de recherche en technologie industrielle
LERTI**

Projet De Fin d'Etudes Pour l'Obtention Du Diplôme de Master en
Génie Mécanique Option Ingénierie des Matériaux et des Surfaces

Assemblages par le procédé TIG de la phase MAX Cr₂AlC

Proposé et encadré Par :

Dr. CHIKER Nabil

Co-promoteur :

Mr. HAKEM Maamar (CRTI)

Réaliser Par :

HASNAOUI Douelkefel

BENRACHED Hichem

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui on voudrait témoigner toute notre gratitude.

On voudrait tout d'abord adresser toute notre reconnaissance au directeur de ce mémoire, Mr. CHIKER Nabil, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

On désire aussi remercier les chercheurs au niveau du CRTI Chéraga et spécialement notre Co-encadreur Mr HAKEM Maamer qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite et au bon déroulement de notre travail expérimental

On voudrait exprimer notre reconnaissance envers les amis et collègues qui nous ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de notre démarche.

Enfin, On tient à témoigner toute notre gratitude à nos familles pour leur confiance et leur soutien inestimable toute au long de notre vie.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : CONCEPTS GENERAUX SUR LES PHASES MAX	
I.1- Historique	3
I.2-Structure	3
I.2.1- Éléments chimiques	3
I.2.2- Structure cristallographique	4
I.2.3- Structure électronique des phases MAX	5
I.3- Microstructure	6
I.4- Propriétés des phases MAX.....	7
I.4.1- Les propriétés électroniques.....	7
I.4.2- Les propriétés thermiques	8
I.4.3- Les propriétés mécaniques.....	8
I.5- Élaboration des phases MAX :.....	10
I.6- Le frittage :.....	10
I.6.1- Le frittage naturel :.....	10
I.6.2- Le frittage réactif :.....	11
I.6.3- Les étapes du procédé sont donc les suivantes :.....	12
I.6.3.1- Le frittage SPS :.....	12
I.6.3.2- Le frittage HP (Hot Pressing):.....	13
I.7- Compaction isostatique à chaud CIC (HIP Hot Isostatique Pressure) :.....	13
I.8- Conclusion :.....	13

Chapitre II : ASSEMBLAGES DES CERAMIQUES

II.1- Introduction.....	15
II.2- Techniques d'assemblages.....	16
II.2.1- Assemblage par la thermocompression.....	16
II.2.2- Assemblage par les techniques de brasage.....	17
II.2.2a- le brasage indirect.....	17
II.2.2b- le brasage réactif.....	19
II.2.3- Procédé d'assemblage TIG (tungstène inerte gaz)	21
II.3- Assemblage des phases MAX par procédé TIG	25
II.4- Conclusion.....	28

Chapitre III : ETUDE EXPERIMENTALE

III.1- Introduction.....	29
III.2- Synthèse de la phase MAX.....	30
III.2.1- Pressage a chaud (Hot Pressing HP).....	30
III.2.2- Mode opération.....	31
III.2.3- Découpage des échantillons.....	31
III.2.4- Préparation métallographique	31
III.3- CARACTERISATION MICROSTRUCTURALE.....	32
III.3.1- Analyse par diffraction des rayons X (DRX).....	32
III.3.2- Microscopie électronique à balayage (MEB) et microanalyse par dispersion d'énergie EDS.....	34

Chapitre IV : ELABORATION ET ASSOMBLAGES

IV.1- Introduction	35
IV.2- Caractérisation de l'échantillon de Cr₂AlC.....	36
IV.2.1- DRX.....	36
IV.2.2- Observation au microscope électronique à balayage (MEB).....	36
IV.3- Assemblage de la phase MAX (Cr₂AlC) avec différents métal d'apport	38
IV.3.1- Etude microstructurales et caractérisation des propriétés mécaniques des différents systèmes Cr₂AlC/Métal réalisés.....	39
IV.3.1.1- Le système Cr₂AlC/Ti.....	39
IV.3.1.1a- Pour le (Ti 20 A).....	40
IV.3.1.1b- Pour le (Ti 50 A).....	42
IV.3.1.1c- Microdureté.....	44
IV.3.2- Le système Cr₂AlC/Cu.....	45
IV.3.2a- Microdureté.....	47
Conclusion générale	48
Références	49

IV.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre portera les résultats expérimentaux, de notre étude. Il est divisé en deux parties :

La première partie présente les résultats de la synthèse de la phase MAX par pressage à chaud (HP) ; La microstructure des produits finals a été entièrement caractérisée avec microscopie électronique à balayage (MEB), et en effectuant des analyses de DRX et de dureté.

La deuxième partie de ce chapitre révèle les résultats expérimentaux des dépôts effectués sur la phase MAX élaboré (MAX/Métal) par le procédé TIG. On a étudié deux différents systèmes MAX/Métal. Les métaux d'apport été sous forme de baguette, ils s'agissent de : Titane et le Cuivre.

La microstructure des joints de chaque système était profondément étudiée, en utilisant la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microanalyse par dispersion d'énergie (EDS), afin d'identifier la nature des phases qui constituent ces interfaces et avoir une idée sur la réactivité des éléments des métaux déposés avec les éléments de la phase MAX ; et en déterminant les défauts causés lors du dépôt par le procédé TIG.

La Caractérisation des propriétés mécaniques de la phase MAX synthétisé et de la zone d'interaction des deux systèmes été effectuée en utilisant des essais de microdureté, qui nous a permis de déterminer la dureté de chaque zone a l'interface MAX/Métal.

IV.2. Caractérisation de l'échantillon de Cr₂AlC :

IV.2.1. DRX :

La figure IV.1 présente Le diagramme de diffraction des rayons X (DRX) de l'échantillon synthétisé par pressage à chaud par l'équipe MAX/MXeen recherche groupe au niveau de l'université de Drexel (Philadelphie, USA).

L'identification des phases par le logiciel X'Pert High Score a révélé l'existence de la phase MAX Cr₂AlC, et deux phase comme impureté qui sont le CrC et l'oxyde d'aluminium Al₂O₃.

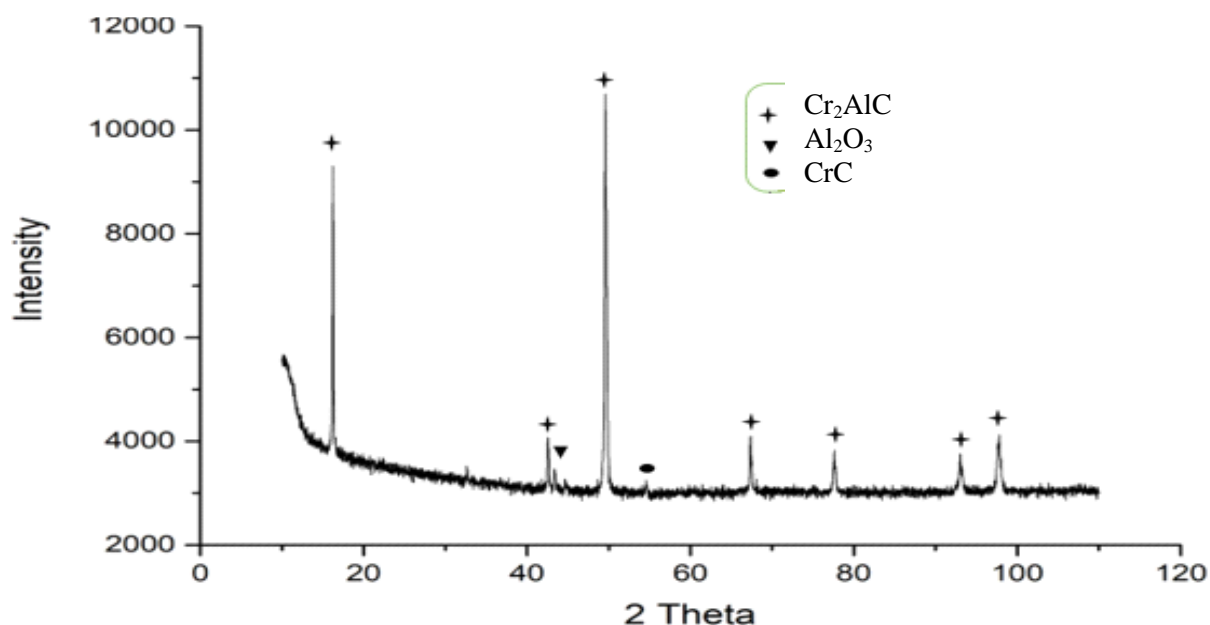


Figure IV.1 : Diagramme de DRX de l'échantillon Cr₂AlC.

IV.2.2. Observation au microscope électronique à balayage (MEB) :

La figure IV.2 montre une micrographie (MEB) d'une surface polie du composite Cr₂AlC synthétisé, elle révèle que l'échantillon est dense. L'analyse chimique (EDS) nous a permis de faire l'analyse quantitative des éléments présents dans les points 1, 2 et 3 (Figure b). Les résultats ont confirmé que l'échantillon est la phase MAX Cr₂AlC. Nous avons déduit la nature des phases présentes dans notre échantillon d'après nos analyses.

Nos analyses ont donné des mesures de (Tableau IV.1) 48.41 at.% Cr, 23.38 at.% Al et 28.21 at.% C soit un rapport de $\approx 2.1.1$ pour le point 1 qui est proche de la valeur théorique attendu de la phase Cr_2AlC ; et 46.42 at.% Cr et 53.58 at.% C pour le point 2, qui représente probablement la phase CrC . Ces résultats sont en concordance avec celles de diffraction des rayons X (DRX).

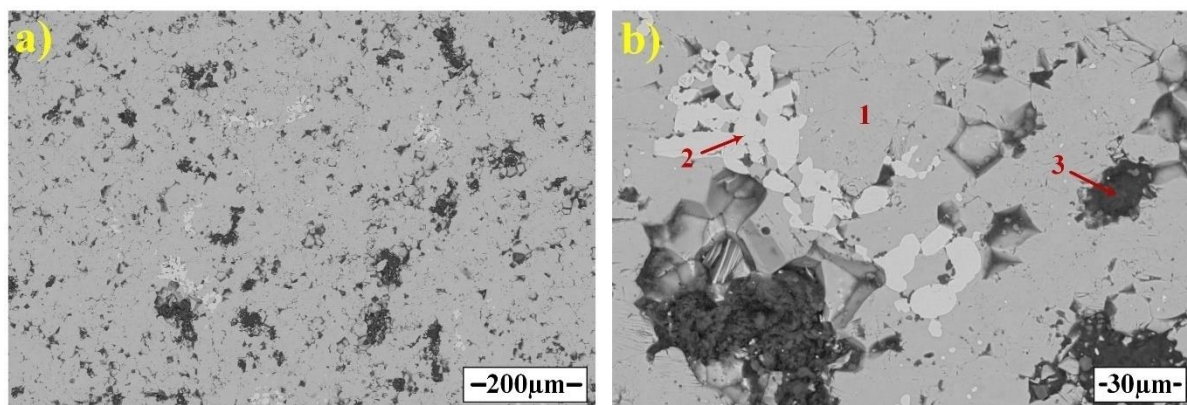


Figure IV.2 : a) Micrographie (MEB) d'une surface de l'échantillon Cr_2AlC ,
b) agrandissement de (a).

Tableau IV 1 : Le résumé des résultats d'EDS en at.% obtenues à partir des diverses régions indiquées sur la figure IV 2).

Région	Cr	Al	C	O	Figure
1	48.41	23.38	28.21	-	IV 1
2	46.42	1.20	53.58	-	IV 1
3	-	36.29	-	63.71	IV 1

IV.3. ASSEMBLAGE DE LA PHASE MAX (Cr_2AlC) AVEC DIFFÉRENTS MÉTAL D'APPORT :

La (figure IV.3), présente un schéma représentatif du processus de brasage appliqué dans notre étude, cette technique est utilisée avec tous les systèmes Cr_2AlC /Métal.

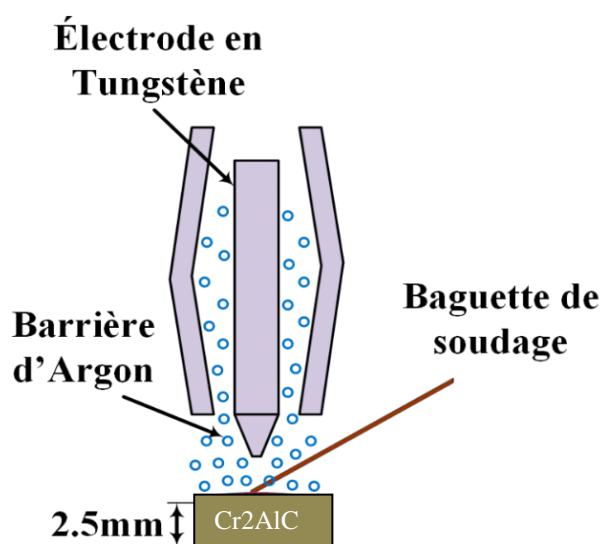


Figure IV.3 : schéma représentatif du processus de brasage.

Les métaux utilisés pour nos assemblages sont en forme de baguette de 1.2 mm du diamètre. Les échantillons de la céramique Cr_2AlC sont de l'ordre de $20 \times 7 \times 2.5 \text{ mm}^3$ de dimension. Afin d'appliquer les métaux sur les céramiques, les surfaces de ces dernières ont été bien nettoyées en faisant un polissage, pour avoir un bon état des surfaces, ce qui facilite l'étalement du métal sur la céramique.

IV.3.1. ÉTUDE MICROSTRUCTURALES ET CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES DIFFÉRENTS SYSTÈMES Cr₂AlC/Métal RÉALISÉS :

IV.3.1.1. Le système Cr₂AlC/Ti :

La figure IV.4 montre des micrographies optique (OM) d'une section transversale du système Cr₂AlC/Ti brasée par TIG en utilisant un courant de 20 A et de 50 A.

Avec un courant de 20 A (figure IV.4a), Il est clair qu'il n'y a pas un bon mouillage entre le Ti (avec un point de fusion de 1660 °C) et la phase MAX Cr₂AlC, car l'angle de contact est supérieur à 90°. Lorsqu'on a augmenté l'intensité du courant jusqu'à 50 A (figure IV.4b), l'angle de contact a été diminué (< 90°) indiquant un bon mouillage.

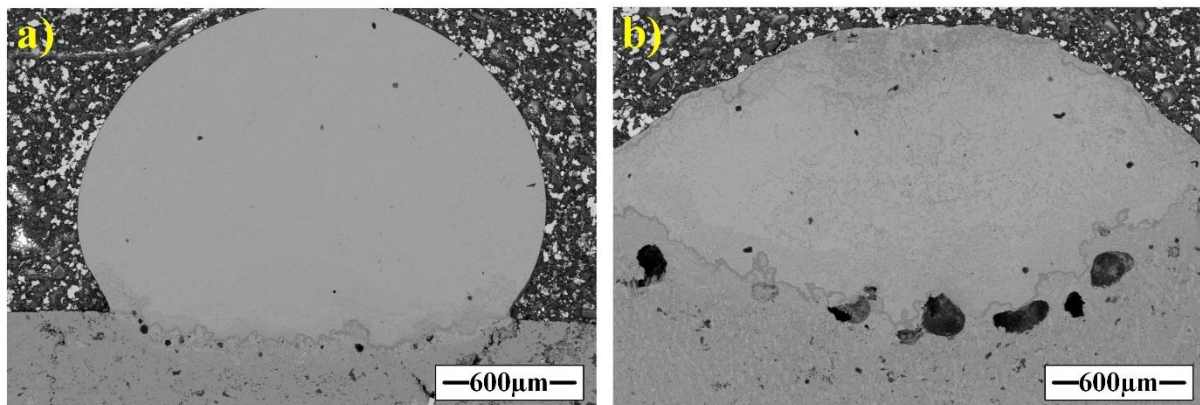


Figure IV.4 : Micrographie optique du système Cr₂AlC/Ti. Le courant utilisé : a) 20 A, b) 50A.

IV.3.1.1.a. Pour le Ti 20 A :

La figure IV.5 montre une micrographie MEB de l'interface Cr₂AlC/Ti (courant utilisé 20A), montrant les zones I, II et III. Les figures IV.5b, IV.5c et IV.5d sont des micrographies MEB à grossissement plus élevé des zones III, II et I, respectivement.

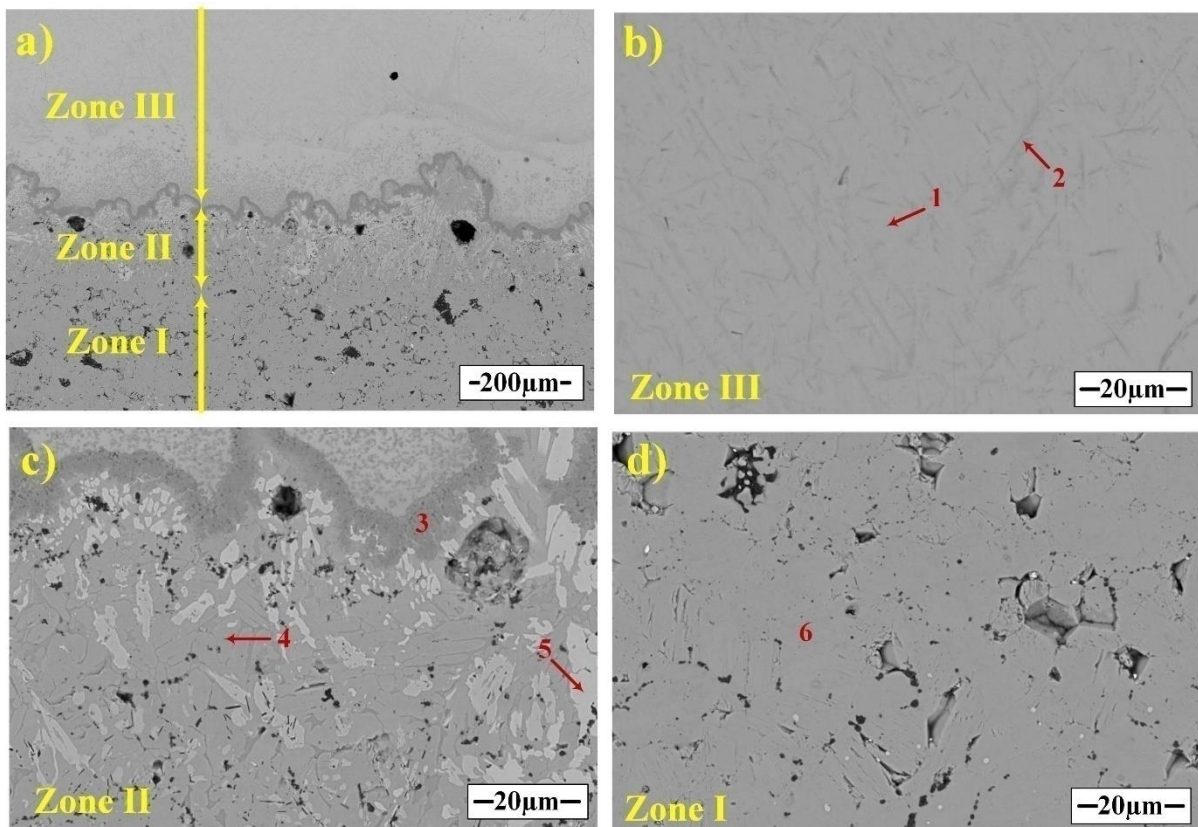


Figure IV.5 : Microscopie MEB en mode d'électrons secondaires de l'interface Cr₂AlC/Ti :
(a) Faible grossissement, montrant trois zones, étiquetées I, II et III. (b),
(c) et (d) représentent les zones III, II et I, respectivement avec un haut grossissement. Le
courant utilisé : 20 A.

Les pourcentages atomiques (at.%) des éléments constitutifs des différentes phases (marqué dans la figure IV.5) déterminées par EDS sont indiquées dans le tableau IV.2).

La zone III (figure IV.5b) est essentiellement constituée d'une matrice de Ti (région 1) dans laquelle des lamelles à base de TiC sont présentes (région 2). Notant que dans les deux régions, l'Al est aussi détecté. Sur la base des résultats présentés dans le tableau IV.2), la composition approximative des lamelles est $\approx \text{Ti}_{0.65}\text{Al}_{0.05}\text{C}_{0.32}$, alors que celle de la matrice

est $\approx \text{Ti}_{0.82}\text{Al}_{0.04}\text{C}_{0.13}$. Ces résultats impliquent que l'Aluminium et le Carbone diffusent dans la région du Titane pendant le temps de brasage.

Nous portons maintenant notre attention sur la zone II représentée sur la figure IV.5c), dans laquelle trois régions sont facilement discernables. La composition chimique de ces phases sont représenté dans le tableau IV.2). On peut apercevoir dans cette zone l'apparition des micropores (régions noir), cette porosité est causée essentiellement par la décomposition du Cr_2AlC en $\text{CrC}_{0.6}$ (région 5), ce qui provoque un rétrécissement volumique.

Pour la zone affectée thermiquement (zone I sur la figure IV.5a), la microstructure était caractérisée par une structure identique a celle de Cr_2AlC avant brasage (Figure IV.5d). Les résultats de l'analyse EDS de la région marquée 6 sont énumérés dans le tableau IV.2). Sur la base de ces résultats, il est raisonnable de supposer que cette région est la phase Cr_2AlC .

Tableau IV 2 : Le résumé des résultats d'EDS en at.% obtenues à partir des diverses régions indiquées sur la figure IV 5).

Région	Cr	Ti	Al	C	Zone	Figure
1	4.46	82.03	0.40	13.11	III	IV.5 b
2	1.59	65.78	0.58	32.05	III	IV.5 b
3	24.61	26.33	17.38	31.67	II	IV.5 c
4	46.05	-	22.78	31.18	II	IV.5 c
5	60.68	-	1.51	37.81	II	IV.5 c
6	45.31	-	22.06	32.63	I	IV.5 d

IV.3.1.1.b. Pour le Ti 50 A :

La figure IV.6 montre une micrographie MEB de l'interface $\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Ti}$ (courant utilisé -50A), montrant les zones I, II et III. Les figures IV.5b, IV.5c et IV.5d sont des micrographies MEB à grossissement plus élevé des zones III, II et I, respectivement.

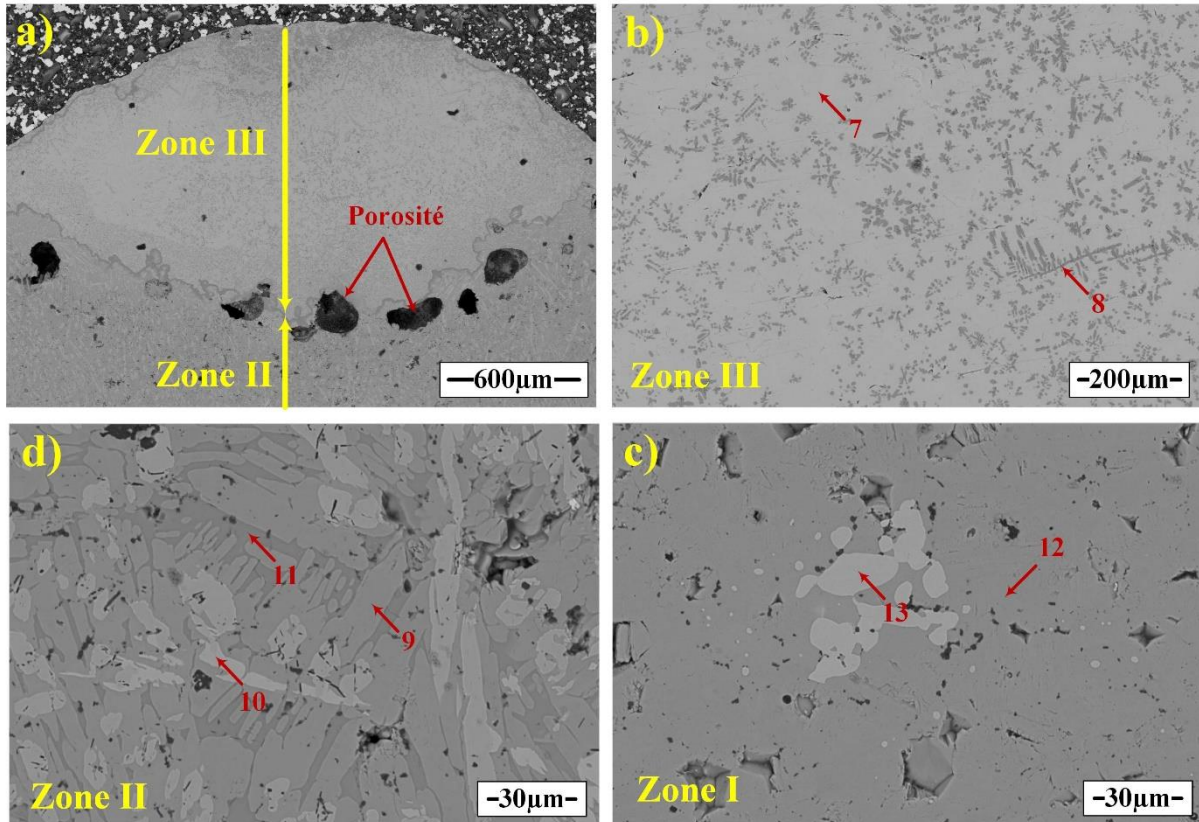


Figure IV.6 : Microscopie MEB en mode d'électrons secondaires de l'interface $\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Ti}$:
(a) Faible grossissement, montrant trois zones, étiquetées I, II et III. (b),
(c) et (d) représentent les zones III, II et I, respectivement avec un haut grossissement. Le
courant utilisé : 50 A.

Pour la zone I, elle représente la zone affectée thermiquement du substrat Cr_2AlC . Comme l'autre échantillon ($\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Ti}$ 20A), la zone II est une zone dans laquelle le Ti est infiltré dans le Cr_2AlC . La zone III est essentiellement une région riche en Ti (zone de brasage). A l'interface $\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Ti}$ on peut observer la présence d'une grande quantité de porosité. Les pourcentages atomiques (at.%) des éléments constitutifs des différentes phases marqués dans cette figure sont indiquées dans le tableau IV.3).

Tableau IV.3 : Le résumé des résultats d'EDS en at.% obtenues à partir des diverses régions indiquées sur la figure IV.6).

Région	Cr	Ti	Al	C	Zone	Figure
7	18.43	50.04	8.01	23.52	III	IV 6 b
8	0.69	57.95	0.38	40.98	III	IV 6 b
9	43.57	-	20.8	33.55	II	IV 6 d
10	55.48	-	-	44.52	II	IV 6 d
11	31.81	-	55.20	12.99	II	IV 6 d
12	46.31	-	22.6	28.21	I	IV 6 c
13	59.53	-	1.2	39.27	I	IV 6 c

La zone III (figure IV.6b) est essentiellement constituée d'une matrice de Ti (région 7) dans laquelle des dendrites à base de TiC sont présentes (région 8). Notant que dans la matrice une grande quantité de Cr a été diffusé (18.43 at.%) ; l'Al est aussi détecté. Sur la base des résultats présentés dans le tableau IV.3), on peut dire que la région 7 représente la matrice de Ti dans laquelle une certaine quantité de Cr, C et Al ont été diffusés, et que les dendrites (région 8) représentent le TiC nonstochiométrique.

Dans la zone II (figure IV.6c), trois régions sont facilement discernables. La composition chimique de ces phases est représentée dans le tableau IV.3), où ils représentent probablement le Cr₂AlC (région 9) et le CrC (région 10) non décomposé et le Cr₂AlC après décomposition (région 11) de la phase MAX. Pour la zone affectée thermiquement (zone I sur la figure IV.5a et IV.5d), la microstructure était caractérisée par une structure identique à celle de Cr₂AlC avant brasage.

IV.3.1.1.c. Microdureté :

La figure IV.7 représente les valeurs de dureté Vickers des zones I, II et III à travers l'interface $\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Ti}$ (50 A, courbe noire) et (20 A, courbe rouge). Les valeurs de dureté à travers l'interface de ces échantillons ont la même tendance, entre la zone I et II on observe que la dureté augmente de 460 à 850HV pour l'échantillon assemblé par 50A, et de 500 à 620 HV pour l'échantillon assemblé par 20A. Ceci peut être expliqué par une décomposition partielle du Cr_2AlC en carbure du chrome (CrC) dans la zone II, ce dernier est plus dur par rapport au Cr_2AlC , et par conséquent, la dureté de cette zone a augmenté.

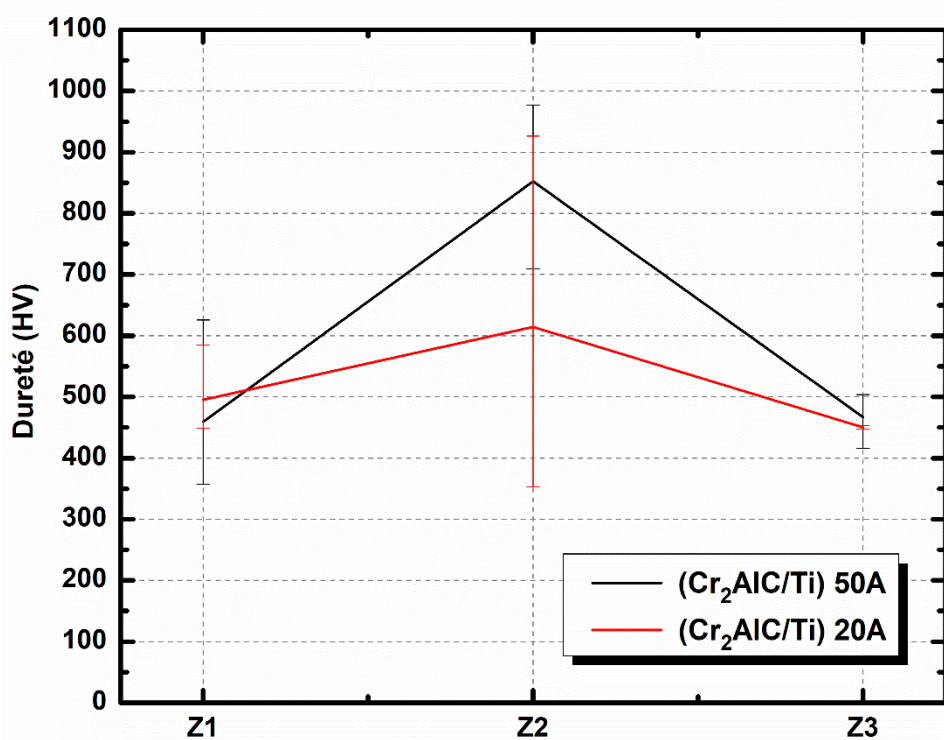


Figure IV.7 : diagramme de dureté de deux échantillons qui ont été traités avec Ti ($\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Ti}$) avec des intensités de courant de 20 A et 50 A.

IV.3.1.2. Le système $\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Cu}$:

La figure IV.8 montre une micrographie MEB de l'interface $\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Cu}$ (courant utilisé 20A). L'étalement du Cu fondu est suivi d'une pénétration profonde du liquide dans le substrat Cr_2AlC , trois zones étiquetées I, II et III sur la figure IV.8 sont apparentes. Les figures IV.8b, IV.8c, IV.8e et IV.8f sont des micrographies MEB à grossissement plus élevé des zones III, II et I, respectivement, et les figure IV.8d, IV.8e, ce sont des agrandissements de la zone II, zone II : X et zone II : H, respectivement, représenté dans IV.8c.

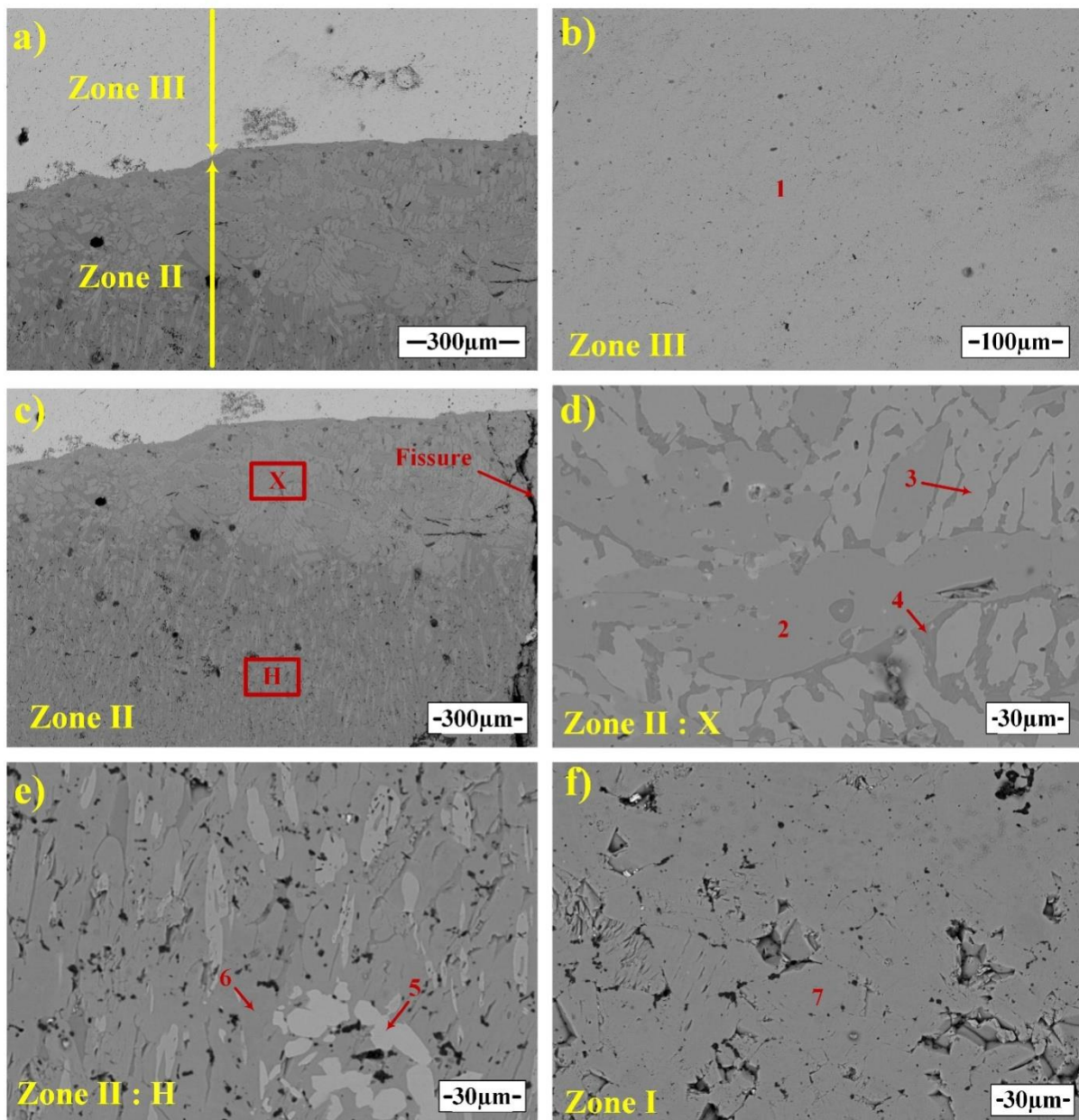


Figure IV 8: Microscopie MEB en mode d'électrons secondaires de l'interface $\text{Cu}/\text{Cr}_2\text{AlC}$:
(a) Faible grossissement, montrant trois zones, étiquetées I, II et III. (b),
(c) et (d) représentent les zones III, II et I, respectivement avec un haut grossissement. Le
courant utilisé : 20 A.

La zone III (figure IV.8b) est essentiellement constituée d'une matrice de Cu (région 1). Notant que dans la matrice une grande quantité d'Al a été diffusé (8.82 at.%).

Dans la zone II (figure IV.8c), cinq régions sont facilement discernables ce son partagée dans deux partie (régions 2,3,4) et (régions 5,6), zone II : X et zone II : H réspictivement. La composition chimique de ces phases sont représenté dans le tableau IV.4. on peut apercevoir aussi une fissure tout au long la zone II, cette dernier est peut etre générer à cause de la différence de coefficient de dilatation thermique entre le cuivre et les produits (phases) présents dans cette zone, ce qui engendre des contrainte au niveau de l'interface. Pour la zone affectée thermiquement (zone I sur la figure IV.8a et IV.8d), la microstructure était caractérisée par une structure identique a celle de Cr₂AlC avant brasage.

Tableau IV.4 : Le résumé des résultats d'EDS en at.% obtenues à partir des diverses régions indiquées sur la figure IV.8).

Région	Cr	Cu	Al	C	Zone	Figure
1	-	91.18	8.82	-	III	IV 6 b
2	54.14	-	0.58	45.17	II	IV 6 d
3	56.8	-	1.43	41.77	II	IV 6 d
4	41.28	3.2	33.56	21.97	II	IV 6 d
5	53.48	-	-	46.52	II	IV 6 e
6	54.8	-	1.43	43.77	II	IV 6 e
7	44.03	-	20.86	35.12	I	IV 6 f

IV.3.1.2.a. Microdureté

La figure IV.9 représente les valeurs de dureté Vickers des zones I, II et III à travers l'interface $\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Cu}$ (20 A). La valeur de la dureté de l'échantillon Cr_2AlC est de l'ordre de 440 HV (Zone I). Dans la zone II du système $\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Cu}$ la dureté (1370 HV) est supérieure à celle du Cr_2AlC . Ceci peut être expliqué par une décomposition partielle du Cr_2AlC de la zone II, ce qui a donné naissance à la phase CrC (Tableau IV.4) qui est plus dure par rapport au Cr_2AlC , et par conséquent, la dureté de cette zone a augmenté.

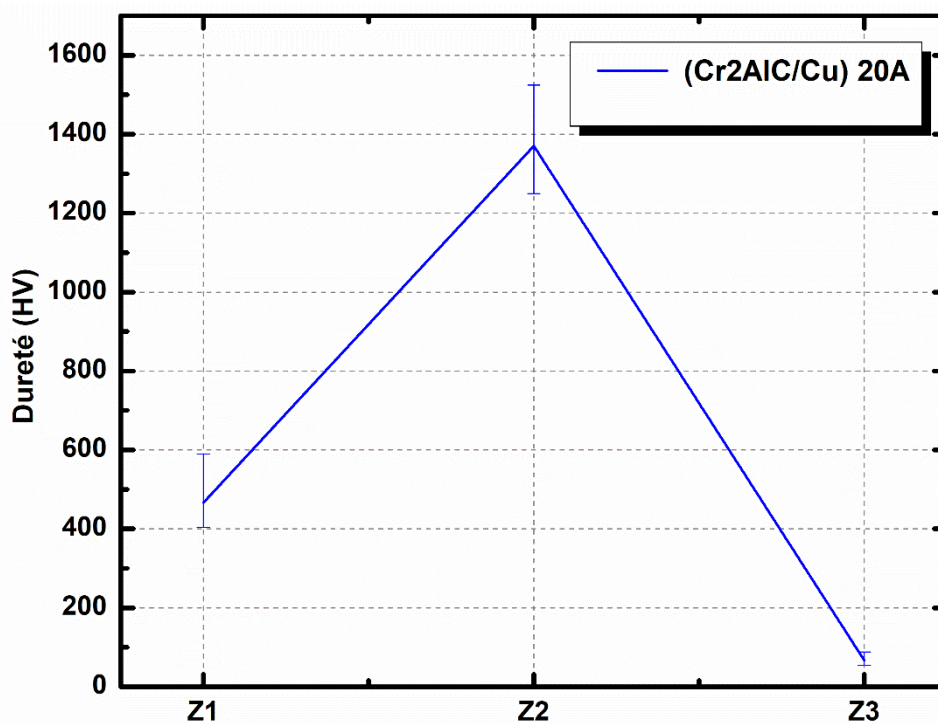


Figure IV.9 : diagramme de dureté pour le système ($\text{Cr}_2\text{AlC}/\text{Cu}$) on applique un courant de 20 A

RÉFÉRENCES

- [1] D. Treheux, F. Gaillard, and M. Romand, Bull, "Cercle d'étude des métaux", vol. **XVI**, no. **6**, pp. 1.1-1.10 (1993).
- [2] N. Ikhlef, "Influence des éléments d'addition dans le cuivre ou implantés dans l'alumine sur l'adhérence à l'état solide du systèmes cuivre/alumine", Ecole Centrale de Lyon, Lyon, Thèse de doctorat., (1991).
- [3] M. Courbiere, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, Thèse de doctorat., (1991).
- [4] Jeitschko, W., Nowotny, H. & Benesovsky, F. Kohlenstoffhaltige ternaire Verbindungen (H-Phase). Monatshefte für Chemie **332**, 2–6 (1963).
- [5] V.Ivchenko, M.Lesnaya ,V.Nemchenko, T. Y. K. some physical properties of ternary compounds in the system Ti-Al-C. Powder Metall. Met. Ceram. **5**, 367– 369 (1976).
- [6] V.Ivchenko, T. Y. K. Abrasive properties of the ternary compounds in the systems Ti-Al-C and Ti-Al-N. Powder Metall. Met. Ceram. **8**, 626–628 (1976).
- [7] Barsoum, M. W. & El-Raghy, T. Synthesis and characterization of a remarkable ceramic: Ti₃SiC₂. J. Am. Ceram. Soc. **79**, 1953–1956 (1996).
- [8] Procopio, a T. & Barsoum, M. W. Characterization of Ti₄AlN₃. Metall. Mater. Trans. A **31**, 333–337 (2000).
- [9] M.W. Barsoum and T. El-Raghy. The MAX phases : unique new carbide and nitride materials. American Scientist, 89 :334_343, 2001.
- [10] Palmquist, J. P. et al. Mn_{n+1}AX_n phases in the Ti-Si-C system studied by thin film synthesis and ab initio calculations. Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater Phys. **70**, 1–13 (2004).
- [11] El-Raghy, T., Barsoum, M. W., Zavaliangos, A. & Kalidindi, S. R. Processing and Mechanical Properties of Ti₃SiC₂: II; Effect of Grain Size and deformation Temperature. J. Am. Ceram. Soc. **60**, 2855–2860 (1999).

- [12] Y.M. Luo, S.Q. Li, J. Chen, R.G. Wang, J.Q. Li and W. Pan, Effect of composition on properties of alumina/titanium silicon carbide composites, *J. Am. Ceram. Soc.*, (2002) 85 3099-3401.
- [13] M.W. Barsoum, "The $M_{n+1}AX_n$ Phases: A New Class of Solids,
- [14] T.El-Raghy, S. Chakraborty, and M.W.Barsoum, "Synthesis and characterization of Hf_2PbC , Zr_2PbC and M_2SnC ($M=Ti, Hf, Nb$ or Zr)", *Journal of the European Ceramic Society*, vol.20, pp.2619-2625,2000.
- [15] Barsoum, M. W. *MAX Phases: properties of Machinable Ternary Carbides and Nitrides*.(2013).
- [16] M.W. Barsoum. *Fundamentals of ceramics*. Mc Graw-Hill, 1997.
- [17] Prediction study of structural and elastic and properties under pressure effect of M_2SnC ($M = Ti, Zr, Nb, Hf$).
- [18] Barsoum, M. . *Fundamentals of Ceramics*. (2002).
- [19] M.W. Barsoum. *Fundamentals of ceramics*. Mc Graw-Hill, 1997.
- [20] Thèses doctorat (Alexandra SOUCHET) Comportement tribologique d'une phase MAX: Transition et effets d'échelle sur différents Ti_3SiC_2 .
- [21] Anselmi-Tamburini, U., et al., Fundamental investigations on the spark plasma sintering/synthesis process: II. Modeling of current and temperature distributions. *Materials Science and Engineering A*, 2005. 394(1-2): p. 139-148.
- [22] Vanmeensel, K., et al., Modelling of the temperature distribution during field assisted sintering. *Acta Materialia*, 2005. 53(16): p. 4379-4388.
- [23] Atkinson, H. & Davies, S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: an overview. *Metall. Mater. Trans. A* 31A, 2981–3000 (2000).
- [24] H. Peng, "Brazing of oxide, carbide, nitride and composite ceramics", In: *Advances in brazing Science, technology and applications*, edited by: Dušan P. Sekulic., **7**, 194-220 (2013).

- [25] M. Boretius, E. Lugscheider und W. Tillmann, "Fügen von Hochleistungskeramik. Verfahren – Auslegung – Prüfung – Anwendung", Düsseldorf: VDI-Verlag (1995).
- [26] J.V. Naidich, "The wettability of solids by liquid metals", In : Progress in surface and membrane science, edited by: D.A. Cadenhead and J.F. Danielli., **14**, 353-484 (1981).
- [27] M. Schwartz, "Ceramic Joining", ASM International, Materials Park, Ohio 44073 (1990).
- [28] H. Mizuhara und T. Oyama, "Ceramic/Metal Seals", ASM Handbook, Vol. **4**: Ceramic and Glasses, ASM International, Materials Park, Ohio, 44073 (1991).
- [29] H. Mayer und E. Heinicke, "Elektrische Isolation mit Aluminiumoxid. Oxidkeramik-Metall Verbundbauteile", Vakuum in Forschung und Praxis., **11**(2), 83- 85 (1999).
- [30] DVS, Merkblatt 3102 "Herstellen von Keramik-Keramik- und Keramik-Metall-Verbindungen durch Aktivlöten", Düsseldorf : DVS. (2005).
- [31] W. Tillmann, I. Buschke und E. Lugscheider, "Herstellungsmöglichkeiten von hochtemperatur beständigen Verbunden nichtoxidischer Ingenieurs keramiken mittels verschiedener Lotkonzepte", DVS-Berichte., **166** , 110-114 (1995),
- [32] S. Hausner and B. Wielage, "Brazing of metal and ceramic joints", in: Advances in brazing Science, technology and applications, edited by: Dušan P. Sekulic., **12**, 361- 393 (2013).
- [33] J.J. Pak, M.L. Santella and R.J. Fruehan, "Thermodynamics of Ti in AgCu Alloys", Metallurgical Transactions., **B 21**(2), 349-355 (1990).
- [34] M.G. Nicholas, "Active Metal Brazing", Br. Ceram. Trans. J., **85**, 144-146 (1986).
- [35] R.W. Messler Jr, "Principles of Welding", John Willey & Sons Edi. New York., 50-55 (1999).
- [36] B. Remacle, "Soudage électrode enrobée MIG-MAG-TIG", ifpm soudage., 47 (2014).
- [37] H.-Y. Huang, "Effects of shielding gas composition and activating flux on gtaw weldments", Materials & Design., **30**, 7, 2404-2409 (2009).

- [38] Y. Hadji, A. Tricoteaux, M.G. Ben Ghorbal, M. Yahi, R. Badji, T. Sahraoui, M. Hadji and M.W. Barsoum, "Microstructure and microindentation of Ti₃SiC₂–Titanium filler brazed joints by tungsten inert gas (TIG) process", *Ceram. Int.*, **43**, 7290-7294 (2017).
- [39] Y. Hadji, A. Haddad, M. Yahi, M.E.A Benamar, D. Miroud, T. Sahraoui, M. Hadji and M.W. Barsoum, "Joining Ti₃SiC₂ MAX phase with 308 stainless steel and aluminum fillers by tungsten inert gas (TIG)-brazing process", *Ceram. Int.*, **42**, 1026-1035 (2016).
- [40] N. Chiker, A. Haddad, Y. Hadji, M.E.A. Benammar, M.Azzaz, M. Yahi, M. Hadji, M.W. Barsoum, "Infiltration Behavior of Cu and Ti fillers into Ti₂AlC/Ti₃AlC₂ Composites during Tungsten Inert Gas (TIG) Brazing", *Ceram. Int.*, **44**, 3282-3290 (2018).
- [41] M.W. Barsoum and T. El-Raghy. "Synthesis and Characterization of a Remarkable Ceramic: Ti₃SiC₂", *J. Am. Ceram. Soc.*, **79**, 1953-1956 (1996).
- [42] T. Lapauw, J. Halim, J. Lu, T. Cabioch, L. Hultman, M.W. Barsoum, K. Lambrinou and J. Vleugels, "Synthesis of the novel Zr₃AlC₂ MAX phase", *J. Eur. Ceram. Soc.*, **36**, 943-947 (2016).
- [43] Y. Zhou, Z. Sun, S. Chen and Y. Zhang, "In-situ hot pressing/solid–liquid reaction synthesis of dense titanium silicon carbide bulk ceramics", *Mater. Res. Innov.*, **2**, 142-146 (1998).
- [44] Y.M. Luo, W. Pan, S.Q. Li and J. Chen, "Synthesis and mechanical properties of in-situ hot-pressed Ti₃SiC₂ polycrystals". *Ceram. Int.*, **28**, 227-230 (2002).
- [45] P. Wang, B.C. Mei, X.L. Hong and W.B. Zhou, "Synthesis of Ti₂AlC by hot pressing and its mechanical and electrical properties", *Transac. Nonferrous. Met. Soc. China.*, **17**, 1001-1004 (2007).
- [46] C. Hu, Z. Lin, L. He, Y. Bao, J. Wang, M. Li and Y. Zhou, "Physical and Mechanical Properties of Bulk Ta₄AlC₃ Ceramic Prepared by an in Situ Reaction Synthesis/Hot-Pressing Method", *J. Am. Ceram. Soc.*, **90**, 2542-2548 (2007).
- [47] D.J. Tallman, E.N. Hoffman, E.N. Caspi, B.L. Garcia-Diaz, G. Kohse, R.L. Sindelar and M.W. Barsoum, "Effect of neutron irradiation on select MAX phases", *Acta. Mater.*, **85**, 132-143 (2015).

[48] A. Boscaino, "New directions in time-resolved neutron diffraction. Probing high power microwave materials synthesis in situ", Thèse de doctorat., 81-95 (2014).