



INFLUENCE DU TRAITEMENT THERMIQUE ET MÉCANIQUE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET STRUCTURALES DES ACIERS AU MANGANÈSE MOULÉS.

O. Ben Lenda¹, F.Sabir¹, S. Elhamzi¹, H. Gziri², A. Ibnlfassi¹, L. Zerrouk¹, E. Saad¹

¹ Université Hassan 1er, faculté des sciences et techniques de Settat, Laboratoire Physico-chimie des procédés et des Matériaux, Maroc.

² Université Hassan 1er, faculté des sciences et techniques de Settat, Laboratoire Ingénierie Mécanique, Management Industriel et Innovation, Maroc.

ABSTRACT

Molded Steel with manganese have approximately 1,2% C and 12% Mn, this high proportion of manganese gives to this alloy a stable austenitic structure on a room temperature. The experimental methods used for metallurgical studies are spark optical emission spectroscopy, optical microscopy, scanning electron microscopy, micro-hardness and hardness test. Steel 1 is heat-treated constituted by 15,516 % of manganese, 2,677 % of chromium and 1,286 % of carbon. Steel 2 is mechanically treated contains 13,454 % of manganese, 1,721 % of chromium and 1,213 % of carbon. Steel 1 has sustained quench at 1070°C, for two different maintaining times on oven 30 and 50 minutes for a thickness of 150 millimeters then for two different thickness 100 and 150 millimeters for a time of 50 minutes. When maintaining time on the oven increase for low dimension, surface's alloy become more ductile. We have applied a mechanical treatment manually on steel 2 surface, his hardness increase significantly.

RESUME

L'acier moulé au manganèse contient environ 1,2% C (% en poids) et 12% Mn, ce taux élevé de manganèse confère à cet alliage une structure austénitique stable à une température ambiante. Les méthodes utilisées pour l'étude métallurgique sont spectrométrie d'émission à étincelle, microscopie optique, microscopie électronique à balayage, essai de dureté et micro-dureté. L'acier 1 traité thermiquement est constitué essentiellement de 15,516 % du manganèse, 2,677 % du chrome et du 1,286 % du carbone. L'acier 2 traité mécaniquement contient 13,454 % du manganèse, 1,721 % du chrome et 1,213 % du carbone. L'acier 1 a subi une hypotrempe à 1070°C, pour deux temps de maintien au four différents 30 et 50 minutes pour une épaisseur de 150 millimètres puis à 50 minutes pour les deux épaisseurs différents 150 et 100 millimètres. Plus le temps de maintien augmente pour des faibles dimensions plus la surface devient ductile. Pour l'acier 2, un traitement mécanique est appliqué manuellement sur la surface qui devient dure.

Indexing terms/Keywords

Molded Steel With Manganese; Heat Treatment; Mechanical Treatment; Mechanical And Chemical Properties.

Council for Innovative Research

Peer Review Research Publishing System

Journal: JOURNAL OF ADVANCES IN PHYSICS

Vol. 10 , No. 2

www.cirjap.com, japeditor@gmail.com



1. INTRODUCTION

L'acier au manganèse inventé par Sir Robert Hadfield en 1882 contient environ 1,2% C et 12% Mn, il a une structure cubique à face centrée [1]. Ce type d'acier combine une ductilité et une dureté élevée avec une bonne résistance à l'usure [2]. Le carbone encourage le durcissement de l'alliage par précipitation et le manganèse améliore les propriétés mécaniques à des températures élevées [3]. L'acier austénitique au manganèse est encore largement utilisé, avec de légères modifications dans la composition. Des travaux récents ont proposé qu'une augmentation des proportions du Manganèse entre 5 et 10% et du carbone entre 0.1 à 0.2% conduise à une amélioration des propriétés mécaniques [4-7].

Les aciers au manganèse sont très utilisés dans les fonderies marocaines. Néanmoins, ils ne peuvent pas être utilisés à l'état brut de coulée à cause de la présence d'excès des carbures du manganèse et du chrome qui les fragilisent ; en effet, la précipitation des carbures aux joints de grains favorise la propagation de microfissures.

L'objectif de cette étude est de traiter ces types d'acier par voie thermique et mécanique afin d'avoir un acier qui serait adéquats à plusieurs applications industrielles. Dans ce travail, nous avons réalisé une caractérisation de ces aciers, nous avons étudié par la suite l'influence du traitement thermique et mécanique sur leurs propriétés.

Des traitements thermiques d'hypertrempe ont été effectués sur l'acier 1 à une température de 1070°C. A travers ces traitements, nous avons mis en évidence l'influence des facteurs temps de maintien dans le four et la dimension de la pièce sur la solubilité des carbures. L'acier 2 a subi un écrouissage par traitement mécanique en appliquant des forces naturelles sur la surface.

2. METHODES EXPERIMENTALES :

2.1. Elaboration des Alliages :

Les alliages qui seront l'objet de l'étude métallurgique sont des aciers au manganèse. L'acier 1 est constitué essentiellement de 15,516 % du manganèse, 2,677 % du chrome et du 1,286 % du carbone. L'acier 2 contient 13,454 % du manganèse, 1,721 % du chrome et 1,213 % du carbone.

Nos alliages sont élaborés comme suit : les éléments sont fondus dans un four à arc électrique muni d'électrodes au carbone à une température presque égale 1500 °C [8]. L'acier brut, avant d'être coulé dans des moules, il est affiné afin d'ajuster la composition chimique en ajoutant des éléments (Manganèse, Chrome, Silicium, Cuivre, Nickel, Phosphore, Vanadium, Tungstène, Molybdène, Cobalt, Niobium, Soufre, Aluminium, Titane) pour former les deux nuances.

2.2. La Spectrométrie d'Emission Optique:

La spectrométrie d'émission optique par étincelage est la technique utilisée pour déterminer la composition chimique d'alliage qui est basée sur l'analyse temporelle du spectre de rayonnement optique émis par l'échantillon lorsqu'il est soumis à une décharge électrique pulsée à haute fréquence. Le spectromètre d'émission à étincelle utilisé de marque JOBIN YVON METALYS.

La préparation des échantillons a été faite par une surfaceuse à disque car ils doivent être plats et exempts de défauts.

2.3. Microscopie Optique et Microscopie Electronique à Balayage:

L'hypertrempe consiste à un refroidissement à l'eau à partir d'une température comprise entre 1050 à 1100°C afin d'éviter la formation de martensite ; les traitements thermiques ont été fait à 1070°C. A cette température, les propriétés mécaniques et chimiques des aciers changent car le carbone et les autres éléments d'alliage diffusent dans la masse de fer.

Nous avons fixé l'acier 2 posé sur un étau à l'aide d'une pince puis des forces successives manuelles ont été appliquées sur la surface de cet échantillon à l'aide d'un marteau, à température ambiante. La déformation plastique d'un matériau cristallin modifie ses propriétés de par son influence sur sa structure interne, ces évolutions de propriétés et de microstructure est appelé écrouissage.

Afin de déceler ces changements au niveau de la structure, nous avons fait recours à la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage. L'analyse micrographique nécessite dans le cas des aciers au manganèse, une attaque chimique faite par un réactif de solution alcoolique nitrique (Nital) composé de 5 ml d'acide nitrique dans 100 ml d'éthanol pur.

2.4. Dureté Et Micro-Dureté :

Les essais de dureté sont effectués par la méthode de BRINELL, à l'aide d'un duromètre universelle. Le pénétrateur est de type bille d'acier de 1,59 mm de diamètre soumis à une charge de 980 N.

L'essai de micro-dureté Vickers à l'aide d'un micro-duromètre, en utilisant un pénétrateur en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° charge de 10 N.



Chaque mesure correspond à la moyenne de 5 prises bien réparties sur la section plane. Les sections sont obtenues par sciage puis dégrossissage, polissage et une finition en utilisant des abrasifs de plus en plus fin, tournant autour d'un axe fixe avec une lubrification en eau afin d'éviter un échauffement qui pourra causer un changement de structure.

3. Résultats et discussions :

3.1. Analyse de la Composition Chimique des Alliages :

3.1.1. Analyse de la Composition Chimique de l'Acier 1 :

Les résultats de l'analyse de la composition chimique de l'acier 1 fournies par le spectromètre d'émission à étincelle sont présentés dans le tableau 1 :

Tableau 1. Composition chimique de l'acier 1.

ELEMENTS	CONCENTRATION (%)
Fer	77,785
Manganèse	15,516
Chrome	2,677
Carbone	1,286
Silicium	0,489 1
Cuivre	0,513
Nickel	0,819
Phosphore	0,103
Vanadium	0,109
Tungstène	0,163
Molybdène	0,086
Cobalt	0,159
Niobium	0,043
Soufre	0,043
Aluminium	0,03
Titane	58,300 ppm

D'après la norme NF A 32-058, l'analyse de la composition chimique d'acier 1 a révélé qu'elle est proche de celle de l'acier austénitique au manganèse de nuance Z 120 MC 17 2-M (GX 120 MnCr 17 2).

3.1.2. Analyse de la composition chimique de l'acier 2 :

L'analyse par spectrométrie d'émission optique par étincelage de l'acier 2 a révélé qu'il est constitué des éléments cité dans le tableau 2 :

Tableau 2. Composition chimique de l'acier 2.

ELEMENTS	CONCENTRATION (%)
Fer	81,527
Manganèse	13,454
Chrome	1,721
Carbone	1,213
Silicium	0,743
Cuivre	0,306
Nickel	0,505
Phosphore	0,097
Vanadium	0,066
Tungstène	0,143
Molybdène	0,056
Cobalt	0,078
Niobium	0,505
Soufre	0,024
Aluminium	0,125
Titane	66,261 ppm

D'après la norme NF A 32-058, L'analyse de la composition de l'acier 2 a montré qu'elle est proche de l'acier austénitique au manganèse de nuance Z 120 MC 12 -M (GX 120 MnCr 12).

3.2. Etude De La Structure :

3.2.1. Structure Micrographique de l'Acier 1 Avant Traitement :

Nous sommes intéressés à la structure micrographique surtout de la surface car il s'agit des traitements superficiels. D'après la température de trempé, la structure de l'acier 1 est austénitique. L'analyse microscopique montre la présence de quelques carbures du chrome et du manganèse (figure 1, figure 2) qui sont précipités de façon fine et uniforme dans les joints des grains.

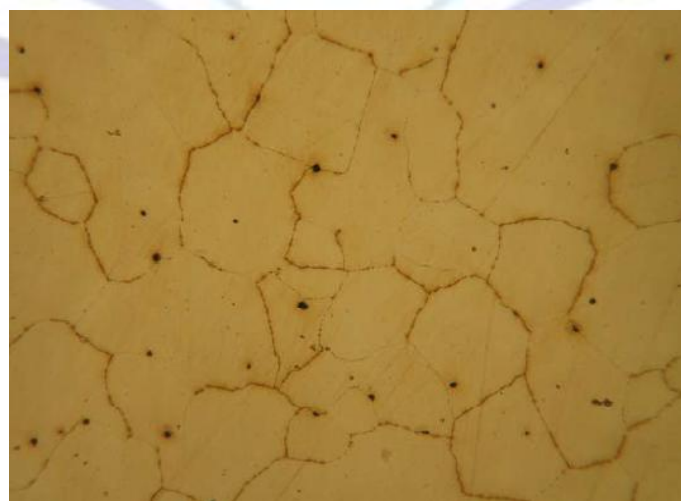
**Figure 1. Coupe micrographique d'acier 1, grossissement 100 X.**



Figure 2. Coupe micrographique d'acier 1, grossissement 500X

La nature des carbures présents dans les aciers au manganèse à l'état brut, est décelée à l'aide Microscope Electronique à Balayage (MEB) (figure 3).

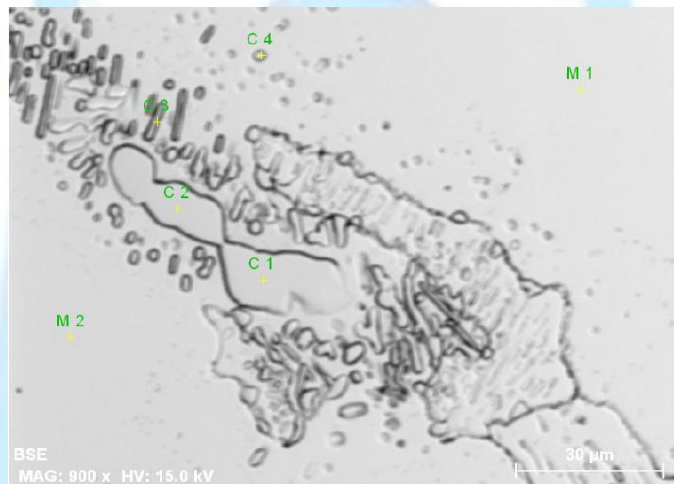


Figure 3. Coupe Micrographique d'acier observée par MEB.

Les spectres obtenus des points C3 et M2 obtenus montrent que la composition des carbures présents dans les aciers au manganèse sont constitués principalement par du manganèse et du chrome.

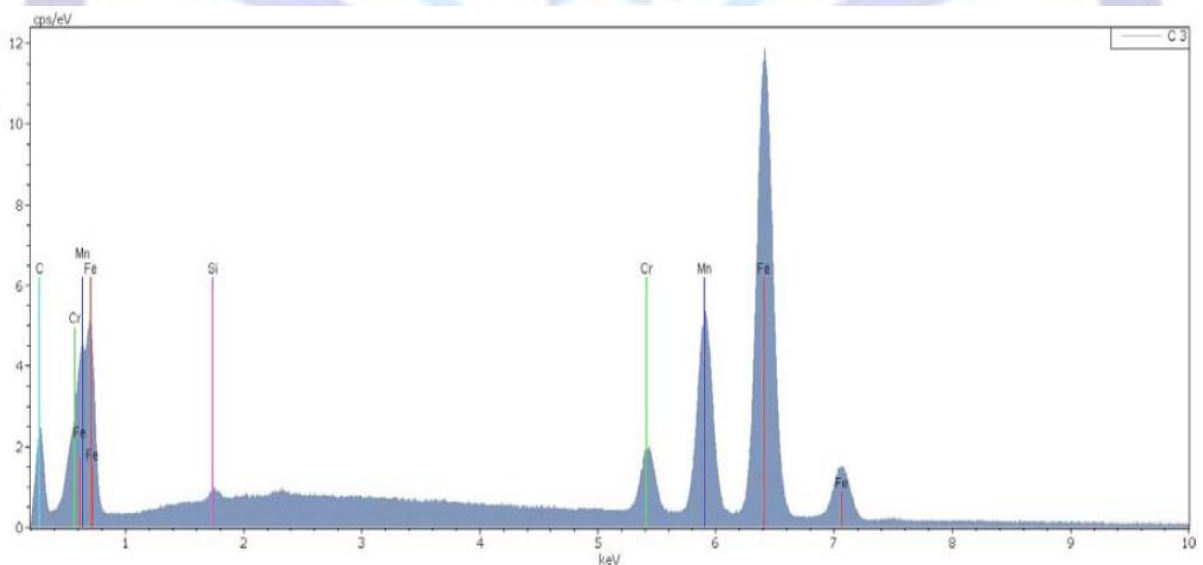


Figure 4. Spectre des carbures présents dans l'acier 1.

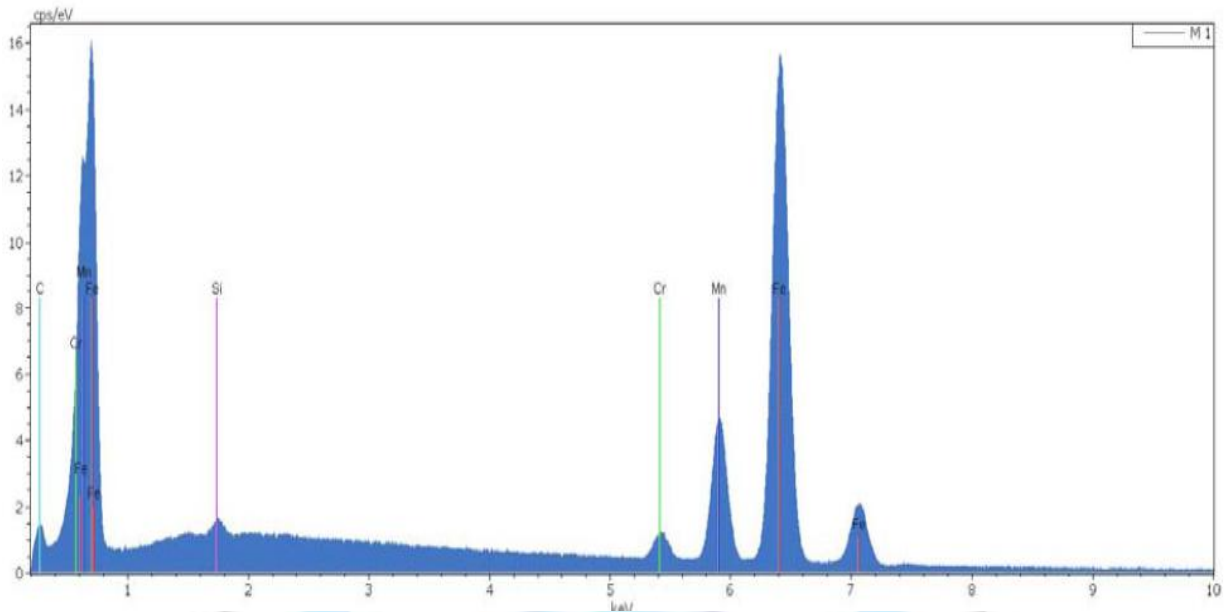


Figure 5. Spectre de la matrice de l'acier 1.

Par la suite, une cartographie de l'image obtenue a été réalisé pour voir la répartition des éléments majeurs fer, carbone, chrome et du manganèse de l'acier 1.

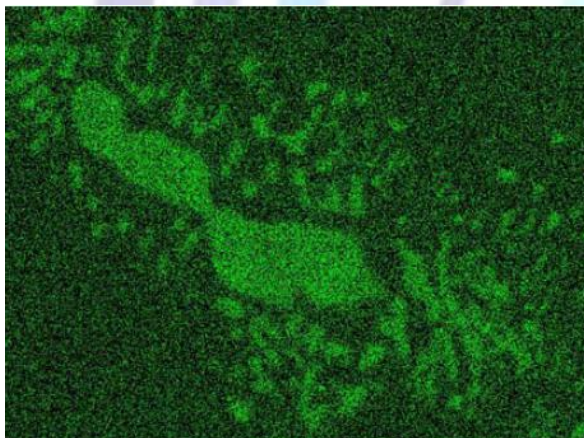


Figure 6. Cartographie de répartition du chrome dans l'acier 1.

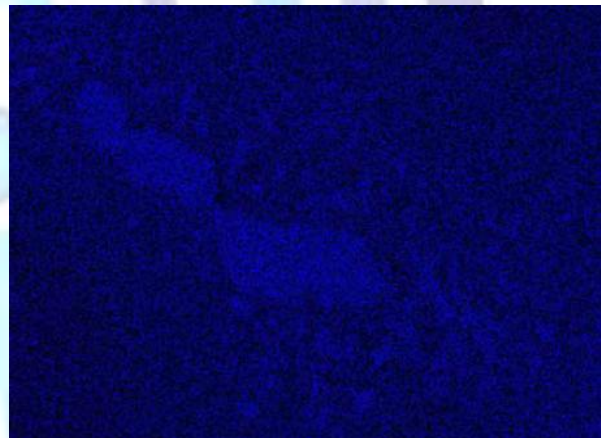


Figure 7. Cartographie de répartition du Manganèse dans l'acier 1.

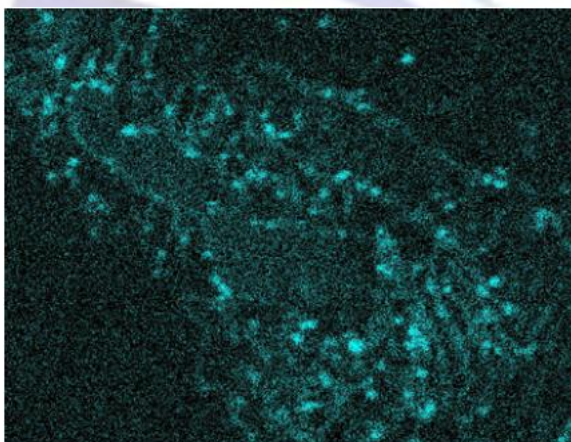


Figure 8. Cartographie de répartition du carbone dans l'acier 1.

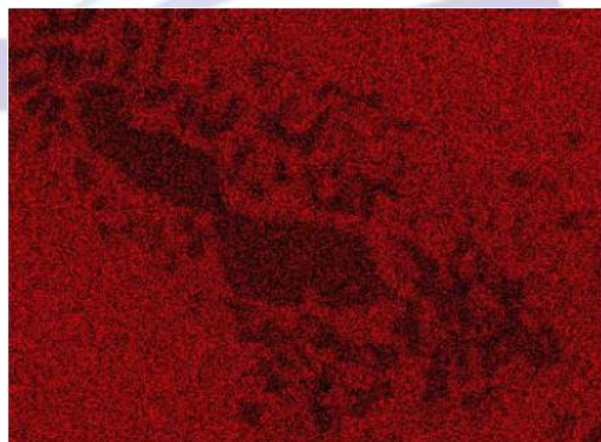


Figure 9. Cartographie de répartition du fer dans l'acier 1.

3.2.2. Structure Micrographique De L'acier 2 Avant Traitement :

L'acier 2 à une structure austénitique avec présence d'un excès des précipités de carbures de chrome et du manganèse aux joints des grains (figure 10, figure 11).



Figure 10. Coupe micrographique d'acier 2, grossissement 200 X.

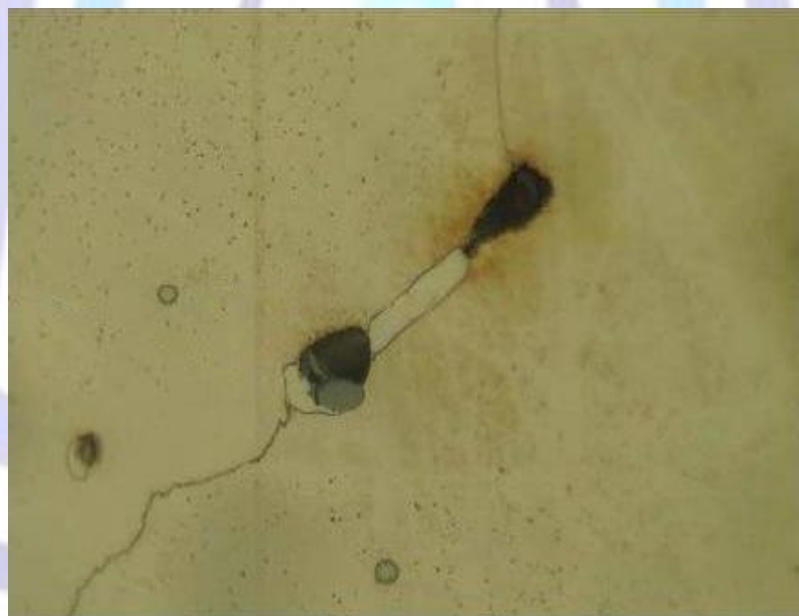


Figure 11. Coupe micrographique d'acier 2, grossissement 1000 X.

3.2.3. Structure Micrographique de l'Acier 1 Après Traitement Thermique :

Nous avons fixé la température du traitement, temps et nature du bain de refroidissement et par la suite nous avons étudié l'influence du temps de maintien en four et l'épaisseur de l'échantillon en comparant la structure de l'acier sans et après traitement.

▪ INFLUENCE DU TEMPS DE MAINTIEN EN FOUR SUR LA STRUCTURE DE L'ACIER 1 :

Le traitement thermique est réalisé sur l'acier 1 à une température d'austénitisation de 1070°C et un refroidissement par trempe à l'eau.

Les paramètres des trois traitements thermiques de l'acier 1 qu'on a effectué sont présentés dans le tableau 3 :

Tableau 3. Paramètres du traitement thermique d'acier 1.

	Traitement 1	Traitement 2	Traitement 3
Epaisseur échantillon (mm)	150	150	≤ 100
Température de Traitement (°C)	1070	1070	1070
Temps de maintien en four (min)	30	50	50
Bain de refroidissement	Eau	Eau	Eau
Temps de refroidissement (min)	10	10	10

En comparant la structure de l'acier avant et après traitement 1 (figure 12, figure 13, figure 14, figure 15), nous remarquons que les précipités de carbures sont encore présents en excès aux joints des grains dans une matrice austénitique.

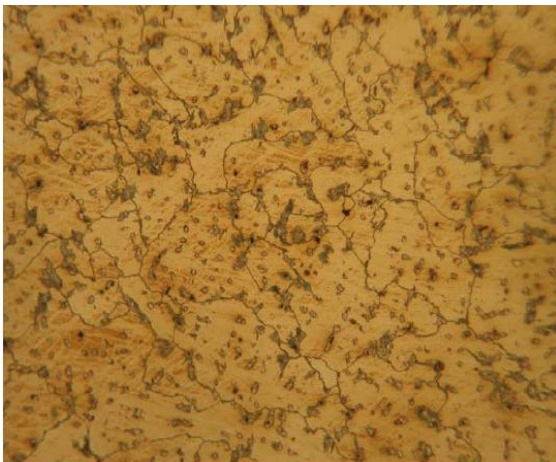


Figure 12. Coupe Micrographique d'acier 1 avant traitement thermique, grossissement 100X.

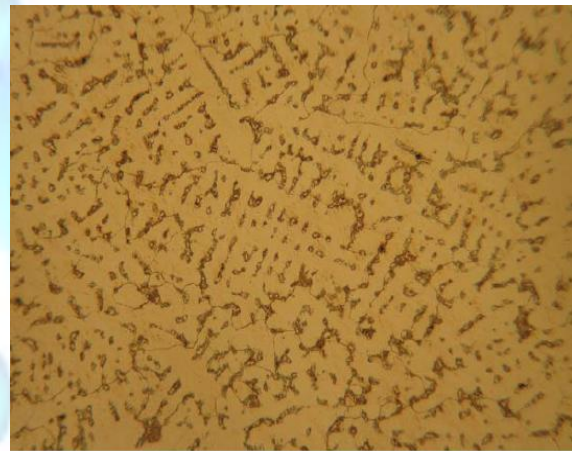


Figure 13. Coupe Micrographique d'acier 1, après traitement thermique 1, grossissement 100X.



Figure 14. Coupe Micrographique d'acier 1 avant traitement thermique, grossissement 500X.

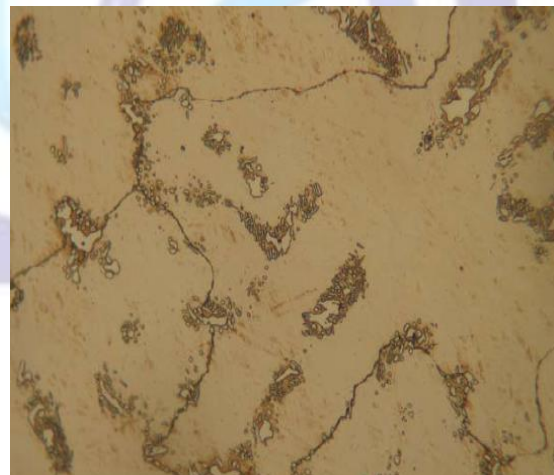


Figure 15. Coupe Micrographique d'acier 1, après traitement thermique 1, grossissement 500X.

Les calories fournies de plus dans le traitement 2 ont permis de dissoudre une partie des carbures au niveau de la surface (figure 16, figure 17, figure 18, figure 19). Par contre, la structure de l'échantillon d'acier au manganèse n'a pas trop changé au niveau du cœur par rapport à son état brut car les précipités de carbures existent encore en excès aux joints de grains (figure 20).

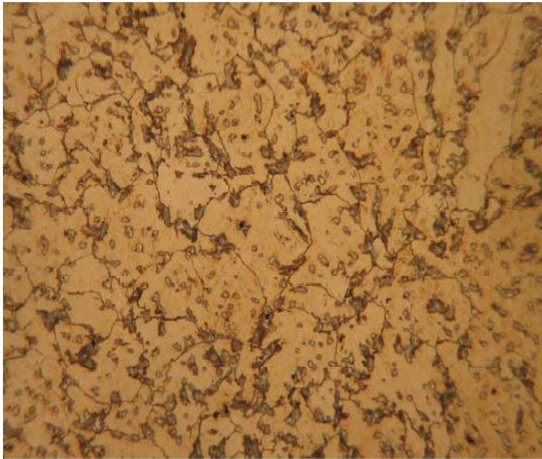


Figure 16 : Coupe Micrographique de la surface d'acier 1, avant traitement thermique, à grossissement 100X.

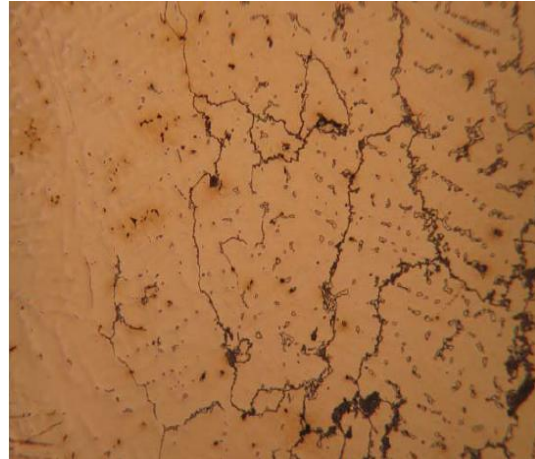


Figure 17 : Coupe Micrographique de la surface d'acier 1, après traitement thermique 2, à grossissement 100X.

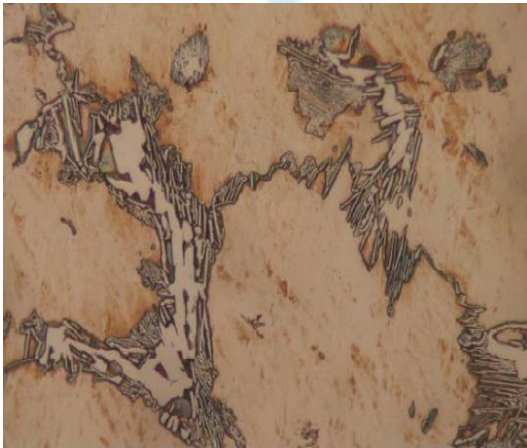


Figure 18 : Coupe Micrographique de la surface d'acier 1 avant traitement thermique, à grossissement 1000X.

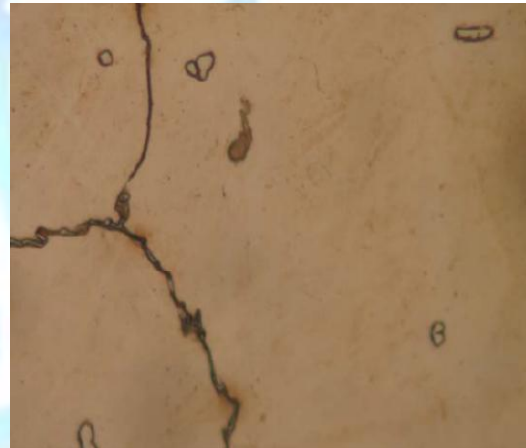


Figure 19 : Coupe Micrographique de la surface d'acier 1, après traitement thermique 2, à grossissement 1000X.



Figure 20 : Coupe Micrographique du cœur de l'acier 1 avant traitement thermique, à grossissement 1000X

▪ INFLUENCE DES DIMENSIONS DE LA PIÈCE SUR LA STRUCTURE DE L'ACIER 1 :

Pour visualiser l'influence des dimensions de la pièce sur le traitement, nous avons gardé les paramètres du traitement thermique 2 en changeant l'épaisseur de la pièce.

Nous pouvons remarquer l'absence de carbures dans la structure austénitique de l'échantillon après le traitement 3 (figure 21, figure 22). Une augmentation de la température a conduit à une augmentation de la diffusion du carbone d'une manière plus faible dans les aciers inoxydables que dans les aciers [9].



Figure 21 : Coupe Micrographique d'acier 1 avant traitement thermique, à grossissement 200X.



Figure 22 : Coupe Micrographique d'acier après traitement thermique 3, à grossissement 200X.

3.2.4. Structure Micrographique de l'Acier 2 Après Traitement Mécanique:

L'écroissage transforme la structure austénitique de la surface de l'acier 2 en martensite (figure 19, figure 21) qui sera accompagné d'une augmentation de sa plasticité [10].

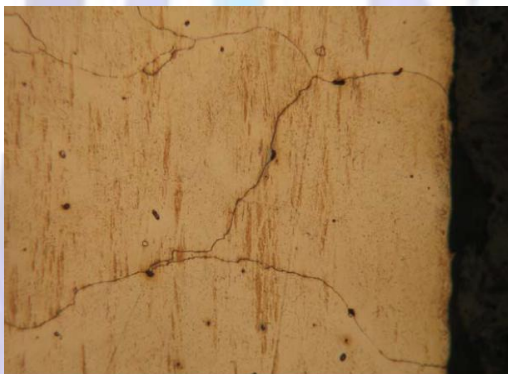


Figure 23. Coupe Micrographique d'acier 2 avant traitement mécanique, grossissement 200X.



Figure 24. Coupe Micrographique d'acier1 après traitement mécanique, grossissement 200X.

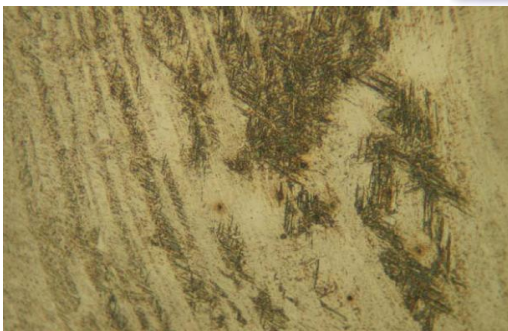


Figure 25 : Coupe Micrographique d'acier 2 avant traitement mécanique, grossissement 500X.



Figure 26 : Coupe Micrographique d'acier 2 après traitement mécanique, grossissement 500X.



3.3. Mesure de la Dureté des Aciers :

3.3.1. Dureté de l'Acier 1 Avant Traitement :

La dureté déterminée moyennant un duromètre universel est égale à 270,4 HB à la surface et 262 HB au cœur. La dureté de notre échantillon d'acier au manganèse est en accord avec les valeurs données par la norme NF A 32-058 (entre 180 et 250 HB).

Le fait que la dureté en surface soit un peu plus élevée que la dureté à cœur pourrait s'expliquer par un léger écrouissage provoqué par le découpage de l'échantillon.

3.3.2. Dureté de l'Acier 2 Avant Traitement :

Les aciers au manganèse n'ont pas une dureté élevée à 230 HB la surface et de 253 HV au cœur de l'acier 2. Ces valeurs de dureté sont comprises dans l'intervalle de dureté (entre 180 et 250 HB) cité dans la norme NF A 32-058.

Il existe une différence entre la dureté au cœur et à la surface de notre échantillon due à un léger écrouissage provoqué lors de la préparation de l'échantillon.

3.3.3. Dureté de l'Acier 1 Après Traitement Thermique :

Nous avons mesuré la dureté avant et après les trois traitements thermiques de l'acier 1 au cœur et à la surface.

▪ INFLUENCE DU TEMPS DE MAINTIEN EN FOUR SUR LA DURETE DE L'ACIER 1 :

Les résultats des mesures de dureté effectuées sur l'acier au manganèse à l'état brut, après traitement thermique 1 et 2 sont représentés dans le tableau 4 :

Tableau 4. Dureté au cœur et à la surface d'acier 1 avant et après traitement 1 et 2.

	Dureté à la surface en HB	Dureté au cœur en HB
Avant traitement thermique	270	262
Après Traitement 1	238	249
Après Traitement 2	201	236

Nous constatons que la dureté de l'acier 1 après traitement 1 et 2 a diminué par rapport à son état brut. La dureté à cœur de l'échantillon après traitement est élevée par rapport à celle de la surface, ceci est dû à une plus grande dispersion des carbures en surface. La dureté dans l'acier 1 a diminué plus après traitement 2 car le temps du maintien est plus élevé.

Nous concluons qu'il faut augmenter le temps de maintien pour que la température soit uniforme en chaque point de notre échantillon afin que les carbures se dissolvent dans l'ensemble du volume traité.

▪ INFLUENCE DES DIMENSIONS DE LA PIÈCE SUR LA DURETE DE L'ACIER 1 :

La dureté de l'acier au manganèse à l'état brut et après traitement thermique 3 sont résumés dans le tableau 5 :

Tableau 5. Dureté au cœur et à la surface d'acier 1 avant et après traitement 3.

	Dureté à la surface en HB	Dureté au cœur en HB
Avant Traitement Thermique	270	262
Après Traitement 3	190	195

La dureté des échantillons après traitement 3 a diminué par rapport à son état brut, il est de 190 HB à la surface et de 195 HB au cœur.

La dureté de l'échantillon après traitement 3 est la même en surface et à cœur, ceci s'explique par une dispersion complète et homogène des carbures dans l'acier. On constate que, plus le volume à traiter est faible, plus les carbures vont dissoudre ; car nous atteindrons une uniformité de la température dans notre pièce facilement.

3.3.4. Mesure de la Micro-Dureté de l'Acier 2 Après Traitement Mécanique :

Le tableau 6 représente la micro-dureté au cœur et à la surface de l'acier 2 en HV après traitement mécanique :

**Tableau 6. Micro Dureté au cœur et à la surface de l'acier 2 après traitement mécanique.**

	Micro-dureté à la surface en HV	Micro-dureté au cœur en HV
Micro-dureté après traitement	540	262,4

Dureté de l'acier 2 avant traitement à la surface 230 HV et au cœur est égale à 253 HV. L'écroissage augmente la dureté en surface de l'échantillon jusqu'à 540 HV à cause de la phase martensite. Alors qu'aucun changement au niveau du noyau n'est remarqué, il garde sa dureté initiale voisine de 262,4 HV. On constate que la structure du cœur est austénitique avec des précipités de carbures de chrome dans les grains reste identique à la structure de l'acier brut.

L'acier au manganèse n'a pas une dureté particulièrement élevée, mais il possède une aptitude remarquable à s'écroir sous l'effet de faibles déformations plastiques. Il a de ce fait, une très bonne tenue au frottement.

L'amélioration des propriétés mécaniques se fait suivant deux mécanismes : une formation de la martensite puis apparition des dislocations autour des nouvelles régions de la martensite à cause de l'expansion du volume lors de la transformation de l'austénite en martensite [11,12].

4. CONCLUSION

Les aciers au manganèse traité de nuances ont une structure austénitique, ils sont fragile à cause de la présence de carbures de manganèse et de chrome en grande quantité dans les joints de grains. Par conséquent, ces aciers ne peuvent pas être utilisés à l'état brut de coulée.

Trois traitements thermiques d'hypertrempe ont été effectués sur l'acier 1 à une température de fixe de 1070°C. A travers ces traitements, on a constaté une dissolution des carbures dans la matrice austénitique à la surface en augmentant le temps de maintien dans le four de 30 à 50 minutes. En diminuant l'épaisseur de 150 mm à 100 mm pour un temps de maintien de 50 minutes, on atteint une dissolution complète et homogène des carbures. Par conséquent, nous pouvons avoir après traitement thermique un acier de surface ductile à cause de l'absence des carbures au sein de phase austénitique.

Grâce à un traitement mécanique, la phase de l'acier 2 a changé d'austénite en martensite ; par conséquent, la dureté de la surface a augmenté de 253 HV jusqu'à 500 HV, alors que le cœur demeure tenace. Par conséquent, à travers un traitement mécanique nous pouvons avoir un acier au manganèse très résistant cela due à la transformation de la phase austénite en martensite à la surface.

REFERENCES

- [1] P.H. Adler, G.B. Olson, W.S. Owen, Strain hardening of Hadfield manganese steels. Metallurgical and materials Transactions A, 1986, **17**, p: 1725–1737.
- [2] O. Grässel, L. Krüger, G. Frommeyer, L.W.Meyer, High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/ TWIP steels development–properties–application. Journal of Plasticity, 2000, **16**, p: 1391–1409.
- [3] Chen M.S, Cheng H.C., Huang, C.F., Chao, C.Y., Ou, K.I., Yu, C.H., Effects of C and Cr content on high-temperature microstructures of Fe–9Al–30Mn–xC–yCr alloys. Materials Characterization, 2010, **61**, p: 206–211.
- [4] H.W. Luo, J. Shi, C. Wang, W.Q. Cao, X.J. Sun, H. Dong, Experimental and numerical analysis on formation of stable austenite during the intercritical annealing of 5Mn steel. Acta Materiala, 2011, **59**, p: 4002.
- [5] M.J. Merwin, Low-Carbon Manganese TRIP Steels. Materials Science Forum, 2007, **539**, p: 4327-4332.
- [6] J. Shi, X.J. Sun, M.Q. Wang, W.J. Hui, H. Dong, W.Q. Cao, Enhanced work-hardening behavior and mechanical properties in ultrafine-grained steels with large-fractioned metastable austenite. Scripta Materiala, 2010, **63**, p: 815-818.
- [7] S. Lee, S.J. Lee, B.C. De Cooman, Austenite stability of ultrafine-grained transformation-induced plasticity steel with Mn partitioning. Scripta Materiala, 2011, **65**, p: 225-228.
- [8] S.A. Balogun, D.E. Esezobor, J.O. Agunsoye, Effect of Melting Temperature on the Wear Characteristics of Austenitic Manganese Steel. Minerals & Materials Characterization & Engineering, 2008, **7**, p: 277-289,
- [9] M. I. Ismail S. S. Iskander And E. B. Saleh, Carburizing Of Steels. Surface Technology, 1981, **12**, p: 341 – 349.
- [10] B.C. De Cooman, Structure–properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite. Current Opinion in Solid State and Materials Science , 2004, **8**, p: 285–303.
- [11] E.M. Bellhouse, J.R. McDermid , Effect of Continuous Galvanizing Heat Treatments on the Microstructure and Mechanical Properties of High Al-Low Si Transformation Induced Plasticity Steels. Metallurgical and Materials Transactions A , 2010, **41**, p: 1460-1473.
- [12] P. Jacques, Q. Furnémont, A. Mertens & F. Delannay, On the sources of work hardening in multiphase steels assisted by transformation-induced plasticity. Philosophical Magazine A, 2001, **81**, p: 1789-1812.