

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA
BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénieur
Département : Métallurgie et génie des matériaux
Domaine : Science de technologie
Filière : Métallurgie
Spécialité : Technologie de fonderie

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Acier au manganèse Hadfield

Présenté par : BENAOURA Ilhem

Encadreur : Pr. HADJI Ali

Co- Encadreur : AYADI Souad

Jury de Soutenance :

HADJI Ali	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Président
HADJI Ali	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Encadreur
AYADI Souad	Doctorante	Badji Mokhtar Annaba	Co- Encadreur
HACINI Mohamed	Docteur	Badji Mokhtar Annaba	Examineur
LEMOUI Abdenacer	Professeur	Badji Mokhtar Annaba	Examineur
HAMANI Med Seghir	Docteur	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciement

J'adresse en premier lieu mes plus profonds remerciements à Monsieur HADJI Ali pour avoir encadré ce travail. En tant que Professeur, il m'a guidé à étudier cette spécialité 'TECHNOLOGIE DE FONDERIE'. Je

vous remercie également de l'honneur que vous m'avez fait en acceptant de présider ce jury. Je tiens à vous exprimer mes sincères remerciements pour votre disponibilité et tous vos précieux conseils.

J'exprime ma sincère reconnaissance à Mademoiselle AYADI Souad pour toutes les discussions et pour sa patience et sa disponibilité pendant le confinement, tous vos conseils ont permis d'enrichir ce travail.

Merci également à Monsieur HACINI Mohamed, Monsieur LEMOUI Abdnacer et Monsieur HAMANI Med Seghir pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je tiens à remercier toutes les personnes de département de Métallurgie et Génie des Matériaux.

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à ma famille et mes proches qui m'ont toujours encouragé dans les voies que je choisissais en m'accordant leur confiance. Je leur témoigne ma reconnaissance avec tout l'amour que je peux leur porter.

Dédicace

Je dédie ce modeste mémoire à : Mes parents qui m'ont soutenu
le long de ma vie, à mes sœurs : Nahla ; Djihen et Mouna, à
mon petit frère Bachir, à tous les membres de ma famille, à la
famille HAMMI et à toutes mes amies amel , asma, outhaila,
serine et rania

Introduction générale.....	02
----------------------------	----

CHAPITRE .I

Généralités sur l'acier Hadfield

I.1. Généralités sur l'acier Hadfield	04
I.2. Définition.....	04
I.3. Microstructure de l'acier Hadfield.....	04
I.4. Caractéristiques mécaniques.....	05
I.4.1. Dureté de l'acier Hadfield.....	05
I.5. Domaine d'utilisation de l'acier Hadfield.....	05

CHAPITRE .II

Effet des éléments de base sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

II. Effet des éléments de base sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield.....	07
II.1. Manganèse	07
II.2. Carbone.....	08

CHAPITRE .III

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécanique de l'acier Hadfield

III. Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécanique de l'acier Hadfield.....	09
III.1. Effet du Chrome.....	09
III.2. Effet du titane.....	10
III.3. Effet combiné du titane et de l'azote.....	12
III.4. Effet du silicium.....	13
III.5. Effet du niobium.....	15
III.6. Effet du vanadium.....	16
III.7. Effet du molybdène.....	18

CHAPITRE. VI

Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

VI. Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield.....	19
--	----

VI.1. Influence du traitement thermique sur la microstructure.....	19
VI.2. Influence du traitement thermique sur les phases existantes dans l'acier Hadfield.....	21
VI.3. Influence du traitement thermique sur le comportement en traction.....	21
VI.4. Influence du traitement thermique sur la dureté	22
VI.5. Influence du traitement thermique sur la résistance à la fatigue.....	22
VI.6. Effet du traitement thermique à double solution sur les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield à haute teneur en manganèse.....	23
VI.7. Métallographies obtenus.....	24
Conclusion.....	38
Références bibliographiques	

Liste des figures

Num des figures	Titres des figures	Page
1	Concasseur à mâchoire	2
2	Effet de la teneur en manganèse sur les propriétés mécaniques d'un acier Hadfield	3
3	Effet de la teneur en carbone sur les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield	4
4	Effet de la teneur en chrome sur les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield	5
5	Cycle de traitement thermique des échantillons expérimentés	6
6	Microstructures des échantillons traités thermiquement	6
7	Effet du Ti sur la taille des grains	6
8	Résistance ultime et limite d'élasticité par rapport à l'ajout de Ti	7
9	Energie d'impact avec l'ajout de Ti	7
10	Evolution de la résistance à l'usure avec l'ajout de Ti	8
11	Dureté Brinell vs ajout de Ti	9
12	Macrographies des aciers examinés	10
13	Précipités formés dans la microstructure de l'échantillon 12MnCrTi	10
14	Courbes de traction des aciers étudiés	11
15	Perte de volume pendant l'essai (a), Perte de volume cumulé pendant l'essai (b)	11
16	Diffractogrammes X d'acier au manganèse avec différentes teneurs en silicium	13
17	Microstructure des aciers au manganèse Hadfield considérés	14
18	Variation de la dureté en fonction de la teneur en silicium	14
19	Microstructures des aciers expérimentaux sans Nb (a) et avec Nb (b) après trempe à l'eau	15
20	Courbe de traction des échantillons étudiés	16
21	Microstructures des aciers étudiés. a : alliage HV-AMS-1, b : alliage HV-AMS-2, c : HV-AMS-3 et d : alliage HV-AMS-4	17
22	Dureté Vickers des échantillons expérimentés	17
23	Perte de poids et résistance à l'usure des échantillons expérimentés	18
24	Résistance aux chocs des échantillons expérimentés	18
25	Micrographies optiques des échantillons étudiés à l'état brut de coulée (a), trempé à l'eau pure (b) et trempé dans le bain de sel à 3% NaCl (c)	19
26	Microscopie électronique en transmission (MET) des aciers Hadfield trempés : (a) à l'eau pure, (b) dans le bain de sel à 3% NaCl	21
27	Diffractogrammes X des échantillons étudiés après trempe : dans le bain de sel à 3% NaCl (a), à l'eau pure (b)	21
28	Courbe de traction des échantillons étudiés après trempe : dans le bain de sel à 3% NaCl (a), à l'eau pure (b)	22

Liste des figures

29	Résultats des tests de fatigue des échantillons étudiés après trempe : dans le bain de sel à 3% NaCl (a), à l'eau pure (b)	23
30	Processus de traitement thermique pour appliqués sur différents échantillons	25
31	Microstructure d'échantillon N°7 avec deux grossissements: a) 50 X et b) 200 X	25
32	Résultats MEB de l'échantillon N°7 avec deux barres d'échelle: (a) 50 μm et (b) 100 μm	26
33	Résultats de spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) de l'échantillon N°7 dans les points A et B	27
34	Microstructure de l'échantillon N°1 (a), échantillon N°2 (b), échantillon N°3 (c), échantillon N°4 (d), échantillon N°5 (e) et échantillon N°6 (f)	35
35	Microstructure de l'échantillon N°8	29
36	Dureté (HRB) (a) et la taille moyenne des grains austénitique (b) en fonction du pourcentage du sel dans le bain des échantillons étudiés	29

Liste des tableaux

Num des tableaux	Titre des tableaux	Page
1	Composition chimique de l'acier Hadfield	01
2	Composition chimique des alliages expérimentés	05
3	Composition chimique des échantillons expérimentés	09
4	Résultats des essais de traction et de résilience	11
5	Perte de volume lors des tests d'abrasion	12
6	Composition chimique des échantillons étudiés	15
7	Composition chimiques des aciers expérimentés	16
8	Composition chimique d'éprouvettes expérimentées	23
9	Différents échantillons d'acier Hadfield avec différents procédures de traitement thermique, T sol. Température de la solution, T sol. Temps de solution, T env. Température ambiante de trempe	24
10	Dureté et la granulométrie moyenne pour différents échantillons	27

Résumé

Ce travail présente une étude générale sur l'acier Hadfield. Il regroupe plusieurs résumés et synthèses des articles publiés par différents chercheurs dans le monde. Il décrit principalement la composition chimique de cet acier, sa microstructure, ses propriétés mécaniques et ses différents domaines d'utilisation. A l'état brut de coulée, la microstructure de cet acier est composée d'austénite et des carbures. L'amélioration des propriétés mécaniques de l'acier Hadfield a fait l'objet de plusieurs recherches. Différents mécanismes ont été proposés, à savoir : l'ajout des éléments d'alliage et les traitements thermiques. Ces paramètres jouent un rôle primordial sur le changement microstructural et par conséquent les propriétés de service de cet acier, ce qui le rend adapté au travail dans des environnements dominés par l'usure.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les aciers au manganèse sont caractérisés par leur meilleure dureté, leur haute résistance à l'usure et leur capacité à l'érouissage élevée. Grâce à leurs propriétés intéressantes, ces aciers sont utilisés dans de nombreuses applications, telles que les voies ferrées, les godets de dragage, les concasseurs à mâchoires et un certain nombre d'opérations à fort impact et résistance à l'usure.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence des éléments de base, des éléments d'addition et des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier au manganèse Hadfield.

La composition chimique est l'un des facteurs les plus importants qui peuvent affecter les propriétés mécaniques. L'étude de son influence permet d'obtenir une microstructure et des caractéristiques mécaniques optimales pour une fonction demandée. Cette étude ne peut pas être complète sans une analyse approfondie de l'effet des traitements thermiques.

Ce travail est divisé principalement en trois parties :

Le premier chapitre présente des généralités sur l'acier Hadfield, sa microstructure, ses caractéristiques mécaniques et ses domaines d'utilisation ;

Le deuxième et le troisième chapitre englobent des synthèses des articles publiés par différents chercheurs sur l'effet des éléments de base et des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés de service de cet acier ;

Le quatrième chapitre traite l'effet des traitements thermiques et particulièrement l'influence du milieu de trempe et le traitement à double solution sur le changement microstructural et les propriétés mécaniques de cet acier.

Le travail est achevé par une conclusion générale.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR L'ACIER HADFIELD

I.1. Généralités sur l'acier Hadfield

Les aciers austénitiques au manganèse sont des aciers fortement alliés au manganèse. Il existe plusieurs types de ces aciers, parmi ces derniers l'acier Hadfield. Cet acier a été découvert par le métallurgiste « R. A. Hadfield » en 1878 [1]. La première usine de moulage de cet acier a commencé en 1892 aux États-Unis [2]. Cet acier est connu par sa capacité extraordinaire de durcissement sous l'effet de certaines sollicitations telles que les chocs répétés ou les forces de frottement. Il présente également de meilleures dureté et résistance à l'abrasion. La haute teneur en manganèse et en carbone accorde à ce type d'acier une structure austénitique à l'état brut de coulée [3].

I.2. Définition

L'acier Hadfield est un acier fortement allié au manganèse. A l'état brut de coulée, sa structure est composée d'austénite et de cémentite alliée au manganèse $(Fe,Mn)_3C$. Cette structure est assurée par la présence du manganèse et du carbone en grandes quantités. Ces deux éléments favorisent, grâce à leur effet gammagène, la formation d'une structure majoritairement austénitique. La composition chimique de l'acier Hadfield standard est présentée par le tableau 1.

C,%	Si (max),%	Mn,%	P (max),%	S,%	Fe,%
1-1.4	1	10-14	0.07	0.03	82-84

Tableau 1. Composition chimique de l'acier Hadfield [4]

I.3. Microstructure de l'acier Hadfield

A l'état brut de coulée, la structure microscopique de l'acier Hadfield se compose d'une matrice austénitique et de carbures. Ces carbures sont formés au dernier stade de solidification. Ils se trouvent généralement aux joints des grains austénitiques.

Afin d'obtenir une bonne ténacité, cette structure doit être assez austénitique. D'où la nécessité d'appliquer plusieurs traitements thermiques favorisant la formation d'une structure complètement austénitique [4].

I.4. Caractéristiques mécaniques

L'acier au manganèse Hadfield (à 1,0–1,4%C et à 10–14%Mn) est caractérisé par son excellente résistance à l'usure, par ses meilleures ténacité et ductilité et par sa bonne capacité à l'érouissage [5]. Ces propriétés rendent l'acier adapté aux différentes applications industrielles telles que les broyeurs à marteaux, les pelles hydrauliques, les chemins de fer et les équipements de broyage des minéraux [6].

I.4.1. Dureté de l'acier Hadfield

L'étude réalisée par Yan et al [8] sur un acier Hadfield montre que le phénomène d'accumulation de dislocation lors de la déformation plastique de cet acier est le facteur déterminant du durcissement. De ce fait, les auteurs ont essayé d'améliorer la dureté de la surface de cet acier en effectuant des essais grenailage. Il ressort de cette étude que la dureté de la surface de l'acier Hadfield est améliorée avec l'augmentation de la durée de l'essai.

I.5. Domaine d'utilisation de l'acier Hadfield

L'acier au manganèse Hadfield est caractérisé par sa grande capacité à l'érouissage au service, sa meilleure dureté et sa haute résistance à l'usure. Il est largement utilisé dans différents secteurs, surtout ceux dominés par l'usure à savoir les voies ferrées, les godets de dragage, les concasseurs à mâchoires et autres [9].



Figure 1. Concasseur à mâchoire [10]

CHAPITRE II

EFFET DES ELEMENTS DE BASE SUR LA MICROSTRUCTURE ET LES PROPRIETES MECANQUES DE L'ACIER HADFIELD

II. Effet des éléments de base sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

II.1. Manganèse

Le manganèse est un élément carburigène. Dans les acier Hadfield, il favorise la formation des carbures de Mn_3C et de $(Fe,Mn)_3C$. L'augmentation de sa teneur de 10 à 14% dans ce type d'acier provoque une augmentation de la quantité de ces carbures à l'état brut de coulée [7]. Ceci conduit à une amélioration de la dureté et de résistance à l'abrasion si ces carbures sont distribués uniformément dans la matrice austénitique.

Le manganèse est également un élément gammagène, l'augmentation de sa teneur dans les alliages Fe-Mn provoque un rétrécissement du domaine martensitique.

Son addition en grande quantité peut conduire à la formation d'une structure complètement austénitique. L'effet de la teneur en manganèse sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield est montré par la figure 2 [11].

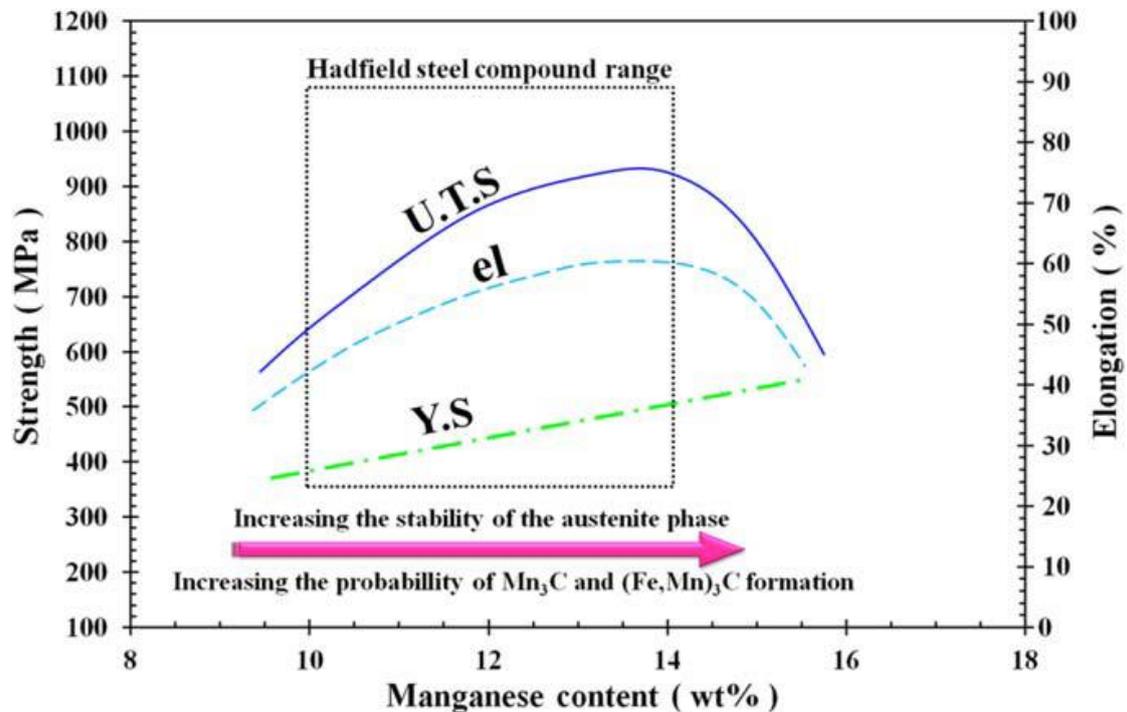


Figure 2. Effet de la teneur en manganèse sur les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield [11]

II.2. Carbone

Le carbone influe considérablement sur le changement des propriétés mécaniques de l'acier Hadfield. Il a été constaté que l'augmentation de sa teneur de 1 à 1.4% dans cet acier favorise la formation des carbures de type M_3C conduisant à une amélioration de la limite d'élasticité, de la résistance à l'usure et de la résistance à la traction mais provoquant une diminution de la ductilité (figure 3) [16].

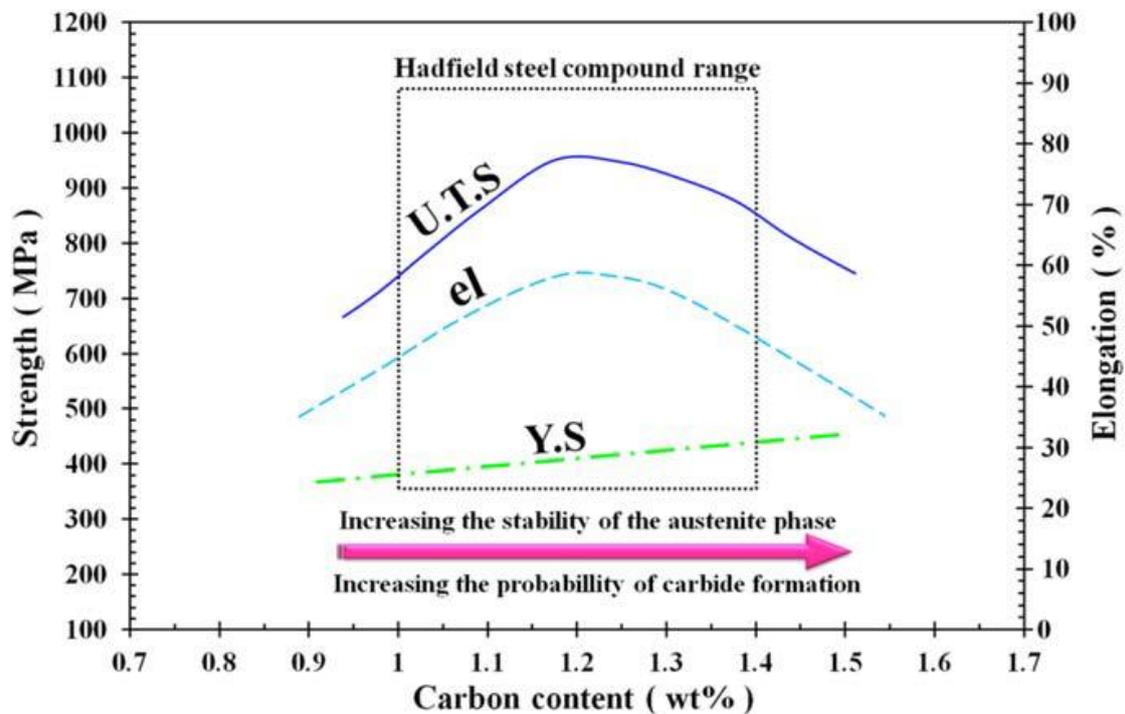


Figure 3. Effet de la teneur en carbone sur les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield [16]

CHAPITRE III

**EFFET DES ELEMENTS D'ADDITION SUR LA
MICROSTRUCTURE ET LES PROPRIETES MECANIQUE DE
L'ACIER HADFIELD**

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

III. Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

III.1. Effet du Chrome

Le chrome est un élément carburigène. Son ajout de 1,5 à 2,5% à l'acier Hadfield conduit à la formation des carbures complexes $(Fe,Mn,Cr)_{23}C_6$. Ces derniers favorisent une amélioration de la résistance à l'usure de cet acier. L'étude de Agunsoye et al [16] comparant les propriétés mécaniques d'un acier Hadfield et d'une fonte au chrome montre que la résistance à l'usure de l'acier Hadfield est supérieure à celle de la fonte au chrome. De plus, Mahallawi et al [17] ont étudié l'effet de 1,7 à 2,3%Cr sur la dureté et le comportement à l'abrasion de l'acier Hadfield. Les auteurs ont rapporté qu'avec l'augmentation de la teneur en chrome, la dureté et la résistance à l'usure augmentent mais la ténacité diminue. Une autre étude [13], dans le même contexte, confirme également ces résultats. Au-delà de 2%Cr, la résistance à la traction et l'allongement diminuent. Cela est dû à la formation de carbures complexes $(Fe,Mn,Cr)_{23}C_6$.

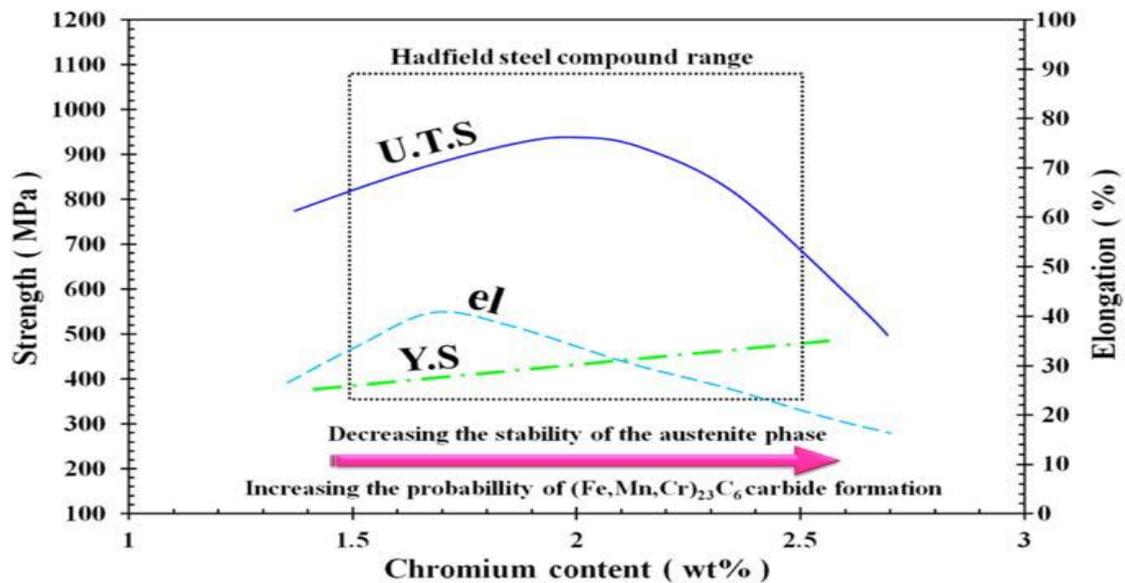


Figure 4. Effet de la teneur en chrome sur les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield [13]

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

III.2. Effet du titane

L'ajout du titane à l'acier Hadfield affine considérablement les grains austénitiques, ce qui améliore sa résistance à l'usure. Bagher et al [17] ont travaillé sur deux nuances d'acier Hadfield avec deux différents pourcentages de Ti comme le montre le tableau 2, ces échantillons ont été traités thermiquement dans un four électrique. Le cycle de traitement thermique est montré sur la figure 5.

	Alliage	C,%	Si,%	Mn,%	P,%	S,%	Ti,%
Hadfield standard	1	1.25	0.52	12.32	0.041	0.004	-
0.05% Ti	2	1.26	0.52	12.5	0.045	0.003	0.05
0.1% Ti	3	1.26	0.55	12.2	0.047	0.003	0.1

Tableau 2. Compositions chimiques des alliages expérimentés [17]

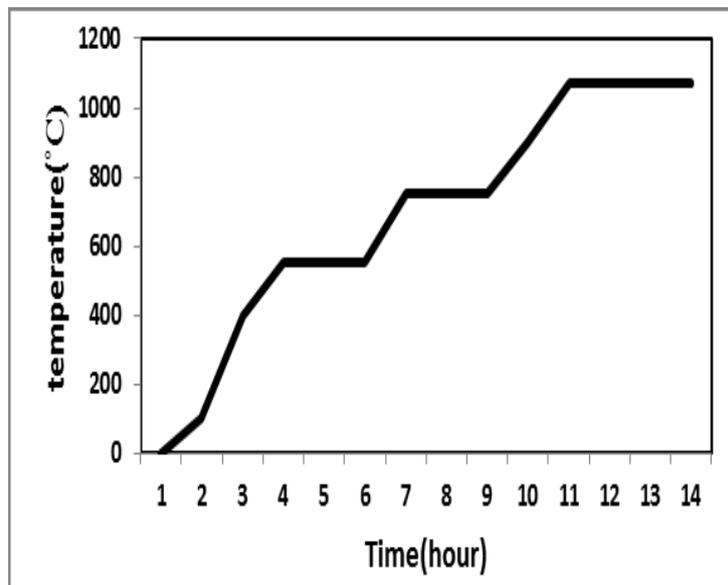


Figure 5. Cycle du traitement thermique des échantillons expérimentés [17]

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

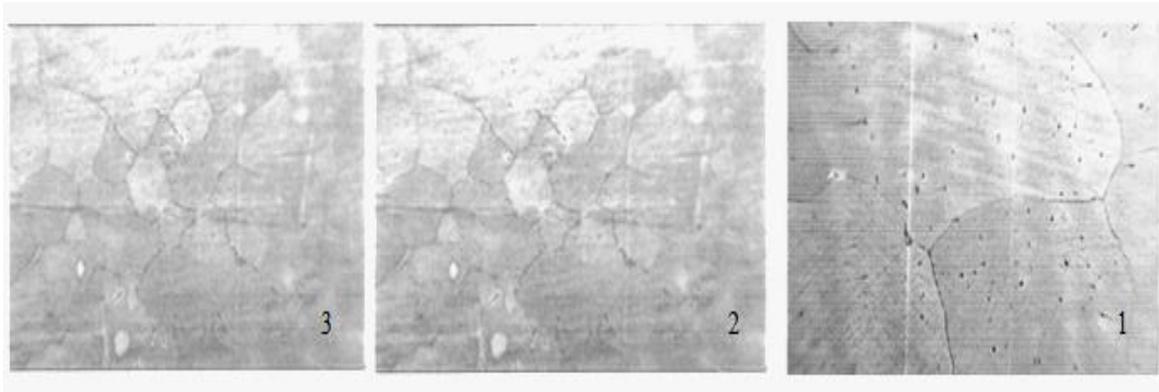


Figure 6. Microstructures des échantillons traités thermiquement [17]

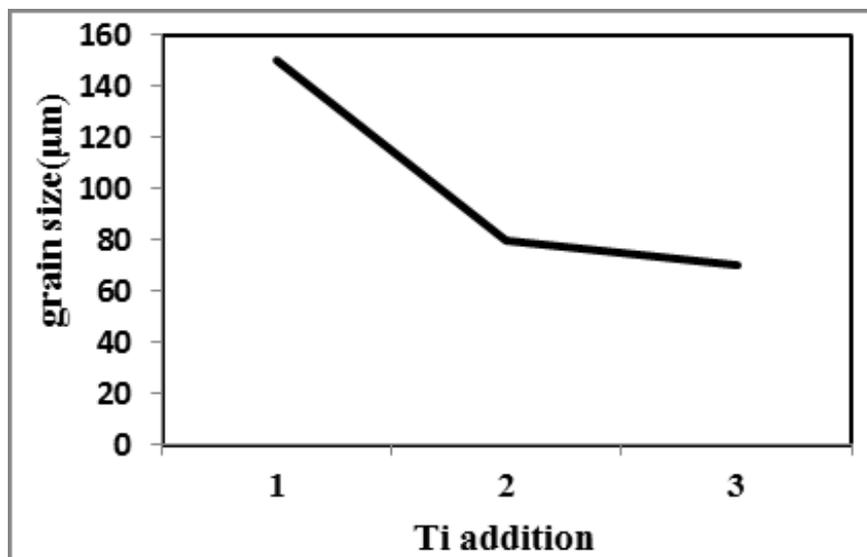


Figure 7. Effet du Ti sur la taille des grains [17]

Il a été montré que l'ajout du titane a affiné la structure de l'acier Hadfield (figures 6 et 7) [17]. Les essais de traction (figure 8) ont montré que l'addition de titane a provoqué une augmentation de la limite d'élasticité et une à réduction de la résistance à la traction de ces aciers. Ce phénomène pourrait être facilement justifié par l'effet durcissant dû à l'ajout titane [17].

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

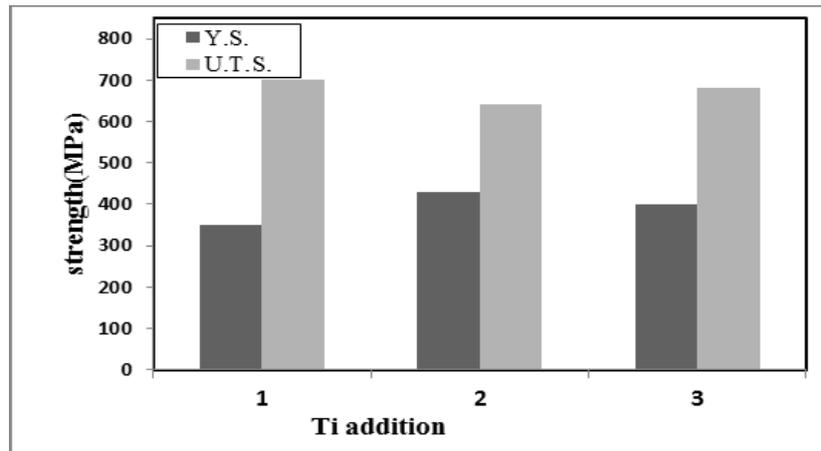


Figure 8. Résistance ultime et limite d'élasticité en fonction de l'ajout Ti [17]

Les résultats des tests de chocs basés sur la méthode Charpy effectués sous une énergie 300J montrent que l'ajout du titane réduit la résistance aux chocs d'environ 10% par rapport à l'acier Hadfield standard (figure 9) [17].

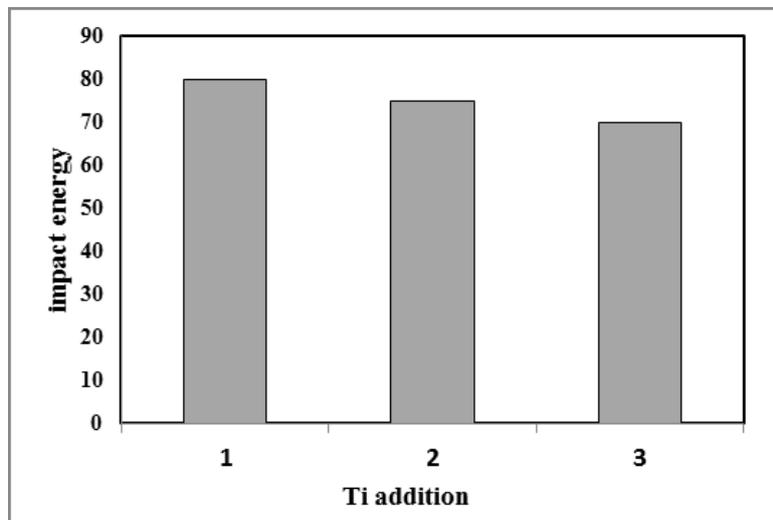


Figure 9. Energie d'impact en fonction de l'ajout de Ti [17]

Les résultats des tests d'usure (figure 10) réalisés dans un broyeur à boulets avec 20 kg de billes en acier et 5 kg de sable de silice pendant 150 heures avec un changement du sable chaque 20 heures montre que le coefficient d'usure augmente avec l'addition du titane [17].

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

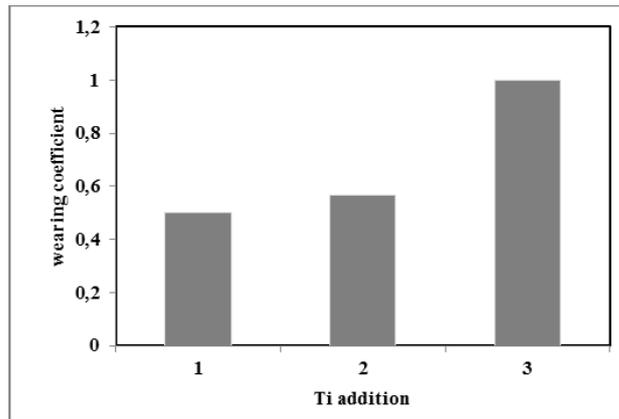


Figure 10. Evolution de la résistance à l'usure avec l'ajout de Ti [17]

Les duretés Brinell (figure 11) des aciers étudiés à l'état traité et après le test d'usure. Les résultats montrent que la dureté à l'état traité augmente en fonction de l'addition du titane. D'un autre côté, après les tests d'usure, la dureté a été améliorée pour les trois aciers comparativement à l'état traité.

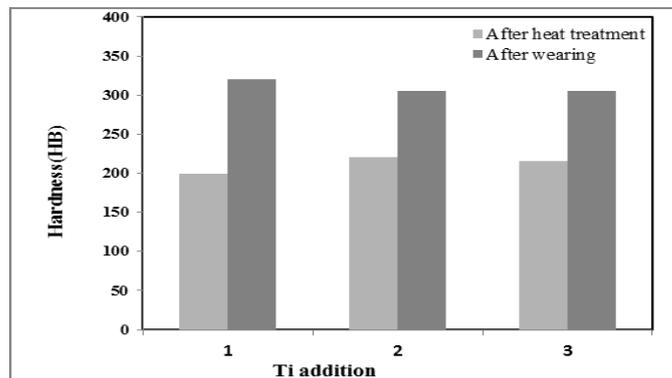


Figure 11. Dureté Brinell en fonction de l'ajout de Ti [17]

III.3. Effet combiné du titane et de l'azote

L'effet de l'ajout du titane combiné à l'azote a été étudié par Siafakas et al [18]. Les auteurs ont étudié quatre nuances d'acier Hadfield alliées à l'azote. Les aciers étudiés contiennent également du titane et/ou du chrome (tableau 3). Les échantillons ont subi un traitement de mise en solution à une température de 1090°C pendant 3h suivi d'une trempe à l'eau.

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

Echantillons	C,%	Mn,%	Cr,%	Ti,%	N,%	Al,%	P,%
12Mn	1.26	12.68	0.58	0.01	0.0113	0.03	0.053
12MnTi	1.26	12.99	0.58	0.10	0.0116	0.06	0.053
12MnCr	1.31	12.67	1.60	0.01	0.0138	0.02	0.060
12MnCrTi	1.31	13.10	1.61	0.11	0.0151	0.06	0.064

Tableau 3. Composition chimique des échantillons expérimentés [18]

L'observation macroscopique des échantillons obtenus a montré que l'ajout combiné du titane et de l'azote favorise la formation des microstructures contenant des grains grossiers (figure 12). Selon l'analyse EDS, ceci est lié à la formation des précipités intragranulaires de carbonitride du titane $Ti(C,N)$. L'oxyde d'aluminium Al_2O_3 a été également révélé (figure 13).

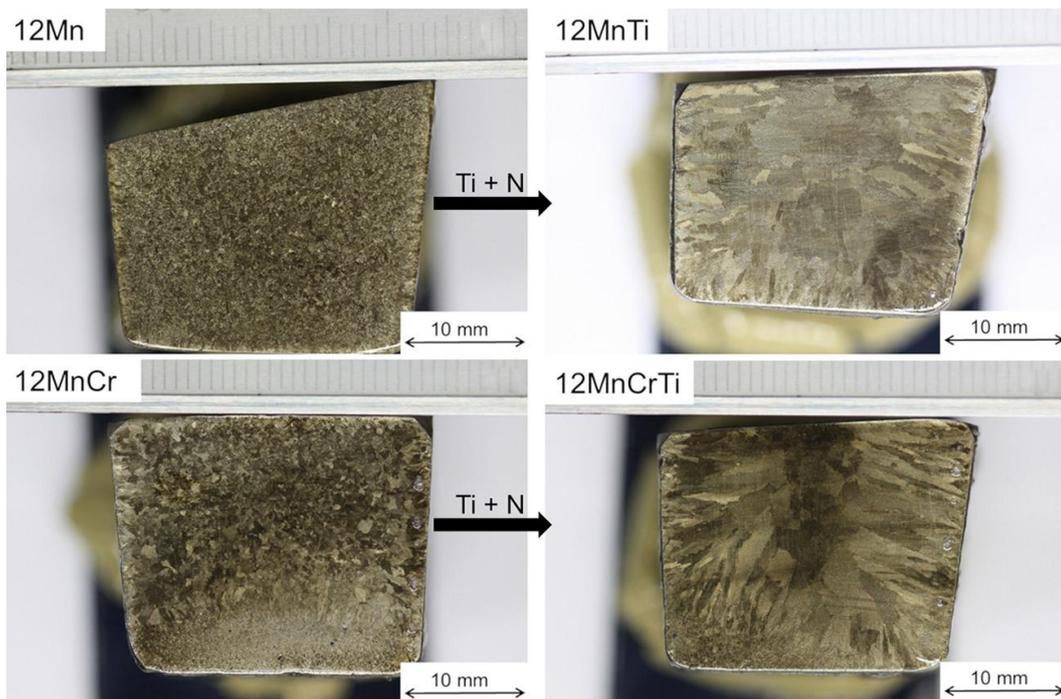


Figure 12. Macrographies des aciers examinés [18]

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

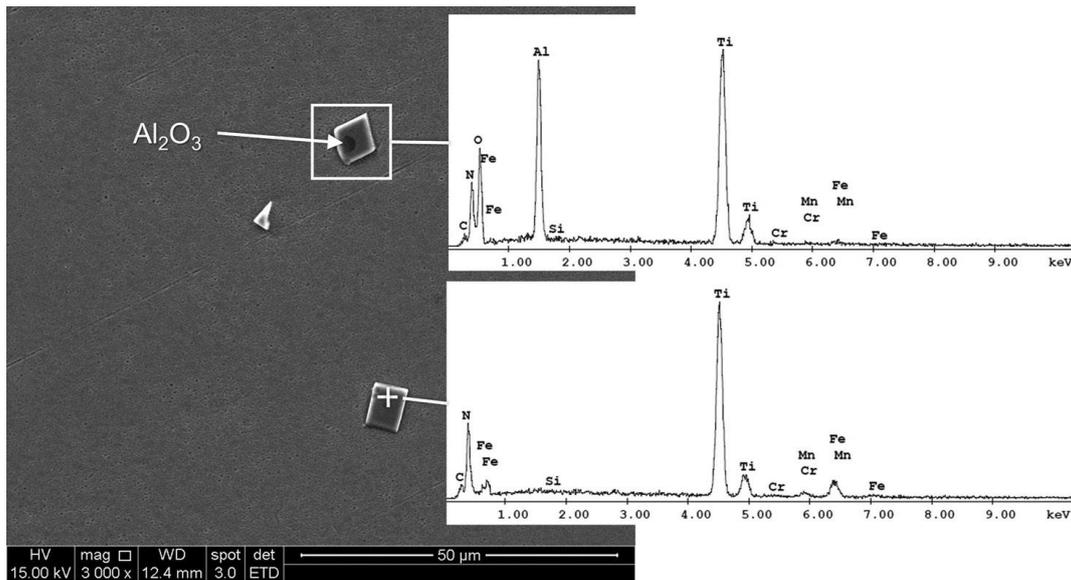


Figure 13. Précipités formés dans la microstructure de l'échantillon 12MnCrTi [18]

Afin d'analyser le comportement mécanique des aciers examinés, des essais de traction et de résilience ont été effectués. Les résultats obtenus (figure 14 et tableau 4) ont montré que les échantillons contenant du titane et de l'azote (avec ou sans addition du chrome) présentent les faibles résistances à la traction. Ceci a été expliqué par les microstructures grossières de ces échantillons. Par contre, les résultats des essais de résilience (tableau 4) ont montré que les aciers contenant seulement le titane et/ou l'azote (sans chrome) présentent les meilleures résistances aux chocs.

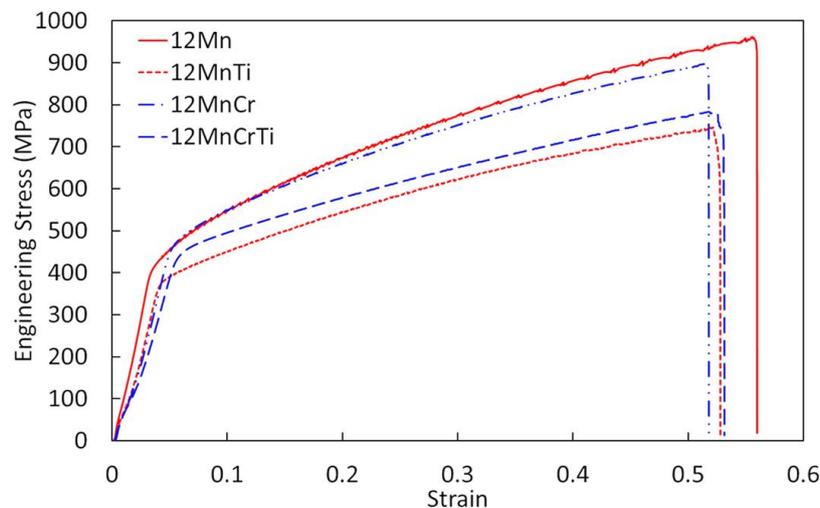


Figure 14. Courbes de traction des aciers étudiés [18]

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

Echantillons	Essai de traction (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement (%)	Résistance aux chocs (J / cm ²)
12Mn	415	955	46	171
12MnTi	378	728	44	179
12MnCr	471	903	42	165
12MnCrTi	444	795	42	148

Tableau 4. Résultats des essais de traction et de résilience [18]

Les tests d'abrasion ont été effectués contre un sable sec avec un indice de finesse entre 40 et 50 sous une force de 130N. Les résultats ont montré que la perte de volume des échantillons 12Mn et 12MnCr est supérieure à celle des aciers contenant du titane et de l'ajoute (figure 15).

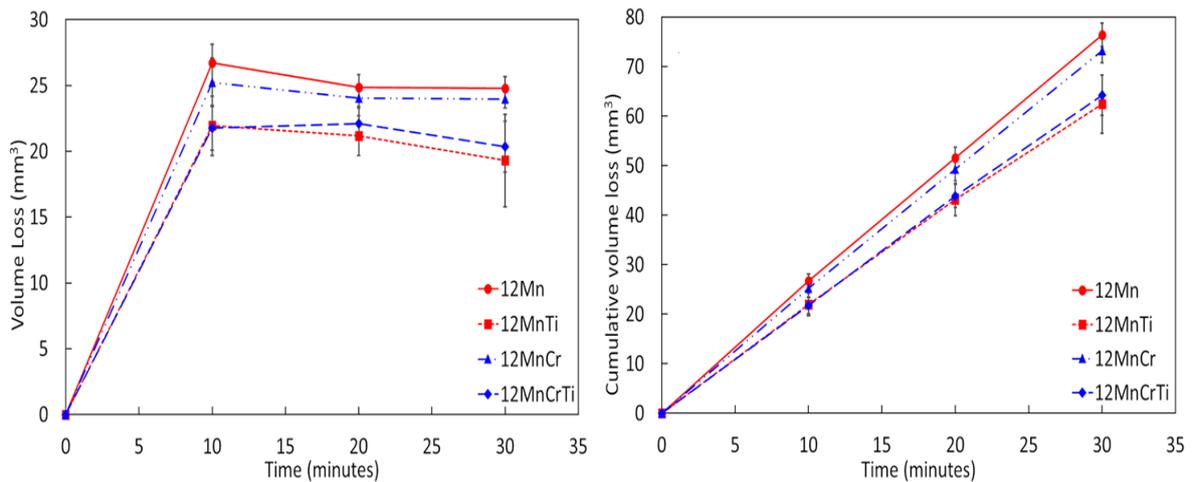


Figure 15. Perte de volume pendant l'essai (a), Perte de volume cumulé pendant l'essai (b) [18]

Echantillons	0-10min	10-20min	20-30min	Volume (total) perdu mm ³
12Mn	26.70	24.86	24.79	76.36
12MnTi	21.94	21.18	19.90	62.41
12MnCr	25.24	24.02	23.96	73.22
12MnCrTi	21.78	22.08	20.34	64.21

Tableau 4. Perte de volume lors des tests d'abrasion [18]

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

III.4. Effet du silicium

Le silicium a un effet considérable sur la dureté de l'acier Hadfield. Il provoque également un changement de la morphologie du carbure Fe_3C [20]. Pour mener à bien ces résultats, Akeel et al [19] ont étudié le changement microstructural à l'état brut de coulée d'un acier Hadfield contenant différentes teneurs en silicium (tableau 5).

Echantillon	C,%	Si,%	Mn,%	P,%	S,%	Cr,%	Ni,%	Mo,%	Fe,%
S0.05	1.26	0.05	13.85	0.05	0.03	0.13	0.07	0.04	Re
S0.66	1.24	0.66	13.56	0.05	0.03	0.14	0.07	0.04	Re
S0.99	1.25	0.99	13.49	0.05	0.03	0.14	0.07	0.04	Re
S2.15	1.23	2.15	13.23	0.05	0.03	0.14	0.07	0.04	Re
S2.91	1.23	2.91	13.98	0.05	0.03	0.14	0.07	0.04	Re
S3.51	1.28	3.51	12.92	0.05	0.02	0.16	0.06	0.04	Re

Tableau 5. Composition chimique des échantillons étudiés [19]

Deux phases sont révélées pour tous les échantillons : l'austénite et le carbure de fer (Fe_3C). Les diffractogrammes X des différents échantillons sont présentés par la figure 16.

- Pour l'échantillon S0.05 : il existe deux pics dominants. Le premier pic (à $2\theta = 44^\circ$) est difficile à identifier, car l'austénite se superpose avec le Fe_3C à cette position et le deuxième pic est lié à l'austénite (à $2\theta = 51^\circ$) ;
- L'échantillon S0.99 montre que l'austénite est devenue la phase la plus dominante ;
- Pour l'échantillon à haute teneur en silicium (S3.51), le carbure devient le plus dominant et sa distribution varie avec l'augmentation du silicium, il repartie d'une manière homogène dans toute la matrice.

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

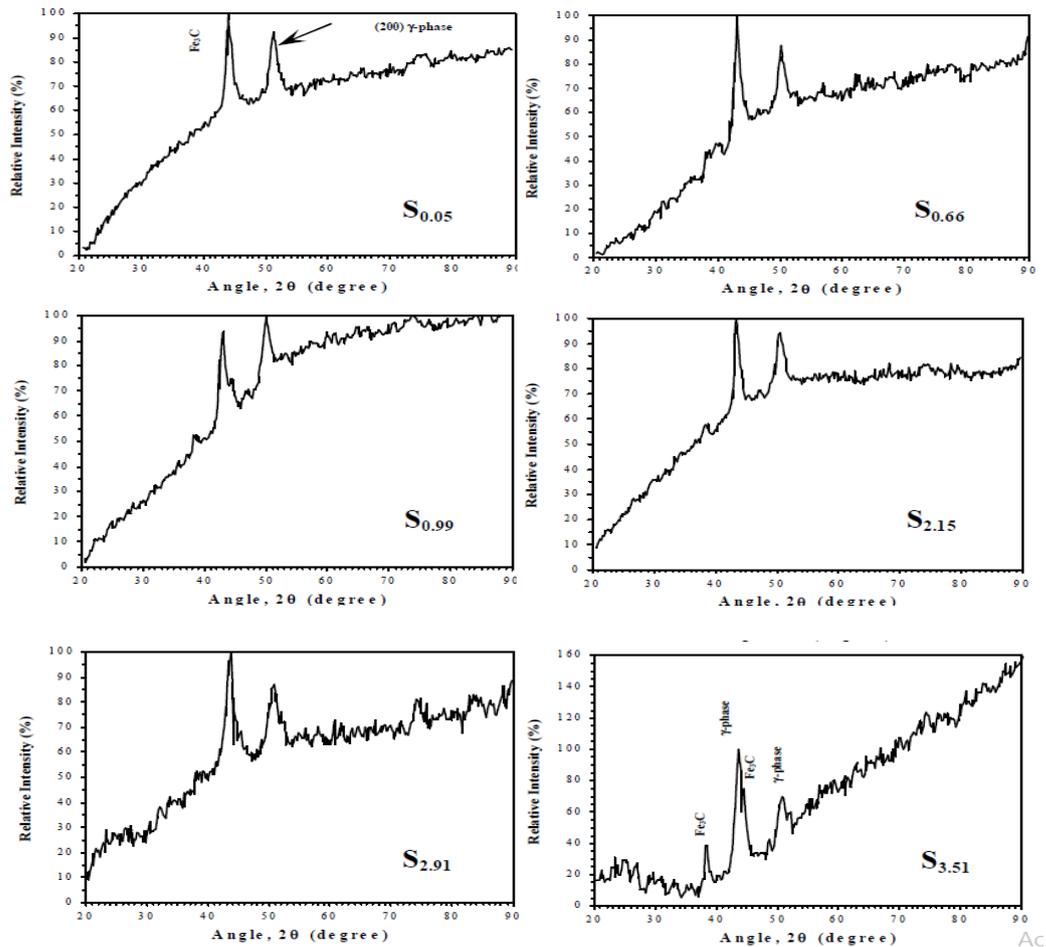


Figure 16. Diffractogrammes X de l'acier au manganèse avec différentes teneurs en silicium [19]

La figure 17 illustre les microstructures de six échantillons ont été fabriquées avec différentes teneurs en silicium (0,05, 0,66, 0,99, 2,15, 2,91 et 3,51%). Ces échantillons ont été notés (selon le pourcentage de silicium contenu) : S0.05, S0.66, S0.99, S2.15, S2.91 et S3.51. Toutes les microstructures, indépendamment du pourcentage de silicium, sont composées d'austénite et du carbure Fe₃C. Dans l'échantillon S0.05, le carbure Fe₃C a une forme aciculaire. Par contre, dans les échantillons S0.66 et S0.99, ce carbure apparaît comme de précipités très fins. Dans les échantillons S2.91 et S3.51, le carbure à une forme globulaire, sa quantité augmente également avec la teneur en silicium.

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

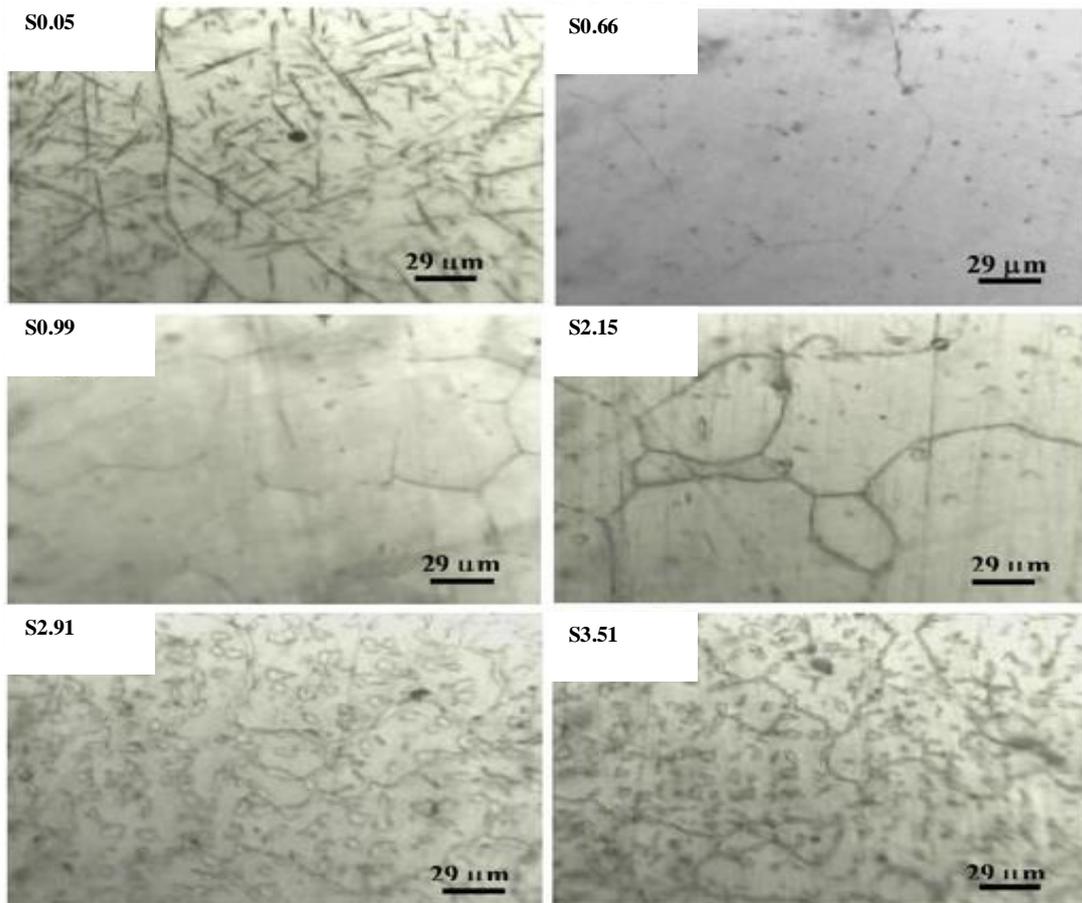


Figure 17. Microstructure des aciers au manganèse Hadfield considérés [19]

La figure 18 illustre la relation entre la dureté et la teneur en silicium. La figure montre que la courbe de dureté diminue puis elle augmente jusqu'à une valeur de 329 HB. Ce comportement peut être lié à la morphologie et la quantité du carbure Fe_3C . Plus le Si augmente, plus la microstructure est riche en fins précipités de Fe_3C , ce qui améliore la dureté.

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

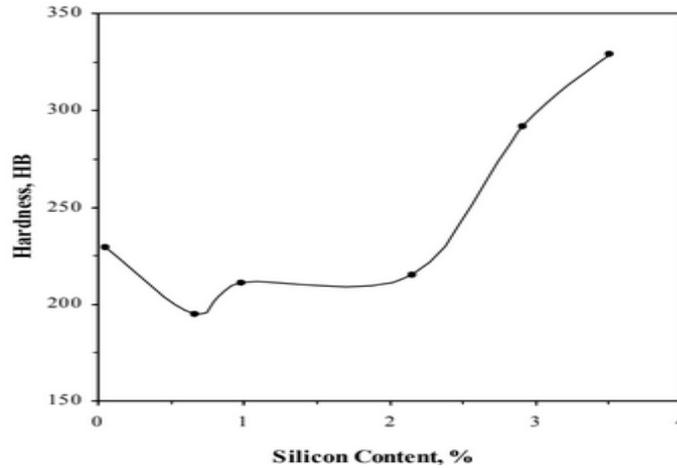


Figure 18. Variation de la dureté en fonction de la teneur en silicium [19]

III.5. Effet du niobium

L'effet du niobium sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier au manganèse a été étudié par Ji et al [21]. Le tableau 6 montre la composition chimique des aciers expérimentés.

Echantillons	C,%	Si,%	Mn,%	P,%	S,%	Nb,%
Acier 1	0.86	0.42	14.4	0.008	0.0055	-
Acier 2	0.95	0.38	14.9	0.007	0.0047	0.012

Tableau 6. Composition chimiques des aciers expérimentés [21]

Après un traitement thermique (chauffage à 1000°C pendant 15min puis une trempe à l'eau), les deux aciers au manganèse ont des microstructures austénitiques (figure 19) dont les grains austénitiques de l'échantillon contenant du Nb sont les plus fins.

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

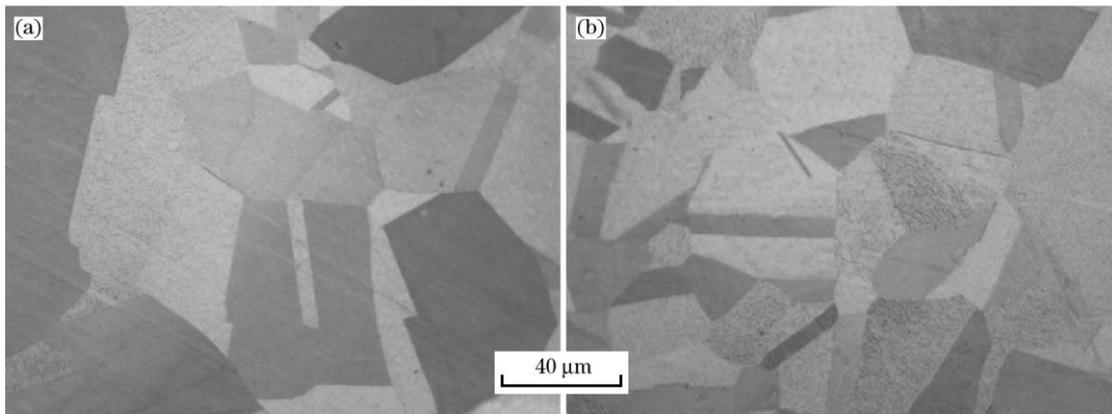


Figure 19. Microstructures des aciers expérimentaux sans Nb (a) et avec Nb (b) après trempe à l'eau [21]

La figure 20 montre les résultats de l'essai de traction. On peut voir que la déformation élastique des deux aciers est limitée à l'inverse de la déformation plastique. De plus, l'acier contenant du Nb présente une meilleure résistance et une plasticité élevée comparativement à celui sans Nb.

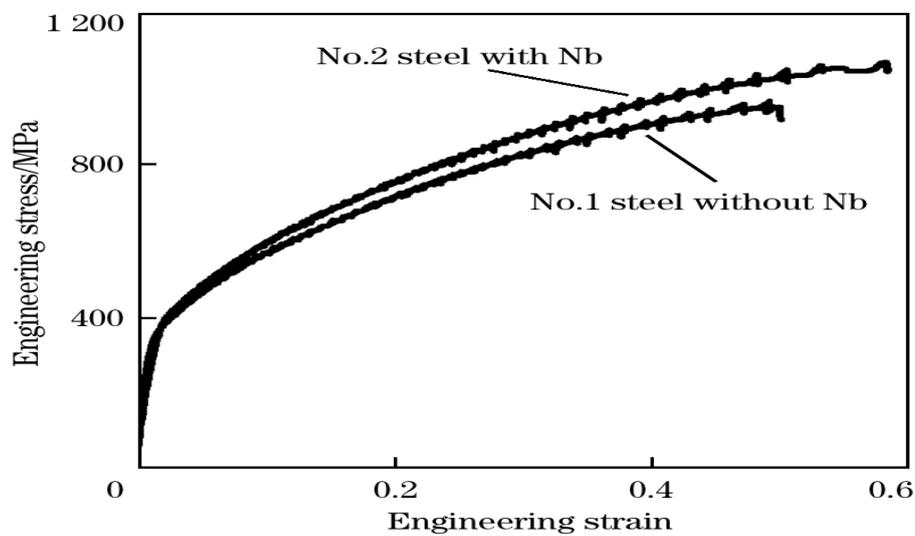


Figure 20. Courbe de traction des échantillons étudiés [21]

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

III.6. Effet du vanadium

En 2011, Moghaddam et al [22] ont étudié l'effet du vanadium et de la variation de la teneur en carbone sur les propriétés mécaniques et la microstructure de l'acier Hadfield. Les compositions chimiques des échantillons étudiés sont présentées par le tableau 7.

Echantillons	Fe,%	C,%	Mn,%	Si,%	S,%	P,%	Al,%	Cr,%	V,%
HV-AMS-1	Base	2.6	12.90	0.69	0.054	0.025	0.10	0.34	9.90
HV-AMS-2	Base	2.8	12.95	0.61	0.067	0.019	0.14	0.31	9.91
HV-AMS-3	Base	3.0	13.10	0.59	0.047	.038	0.11	0.27	10.04
HV-AMS-4	Base	3.3	12.90	0.67	0.063	0.040	0.93	0.29	10.15
Standard	Base	1.21	12.80	0.66	0.08	0.039	0.09	0.09	-

Tableau 7. Composition chimique des échantillons expérimentés [22]

L'expérience a montré que la teneur en carbone a un effet sur la morphologie du carbure de vanadium de l'acier à haute teneur en manganèse allié au vanadium. Le carbure de vanadium révélé est un carbure primaire, il se forme entre la température de liquidus et de solidus (figures 21). Ces carbures conduisent à une augmentation de la dureté d'environ 60% par rapport à l'acier Hadfield standard (figure 22). Ce changement est en relation directe avec l'augmentation de la teneur en carbone. On remarque également une amélioration de la résistance à l'usure (figure 23) et une diminution de la résistance aux chocs (figure 24) [22].

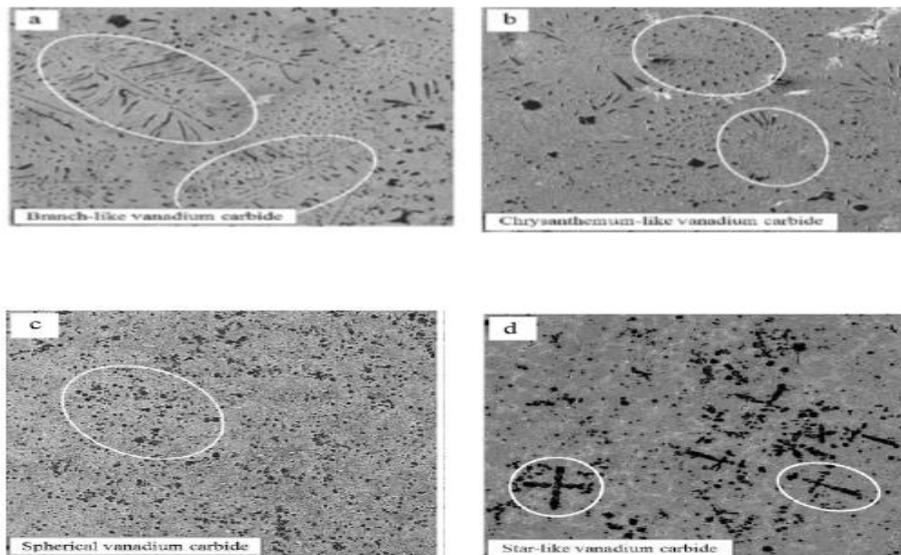


Figure 21. Microstructures des aciers étudiés. a : alliage HV-AMS-1, b : alliage HV-AMS-2, c : HV-AMS-3 et d : alliage HV-AMS-4 [22]

Effet des éléments d'addition sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

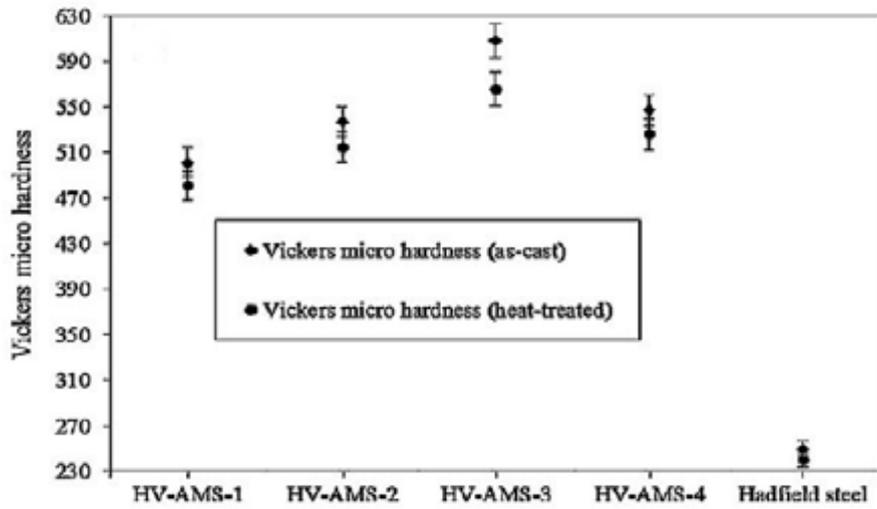


Figure 22. Dureté Vickers des échantillons expérimentés [22]

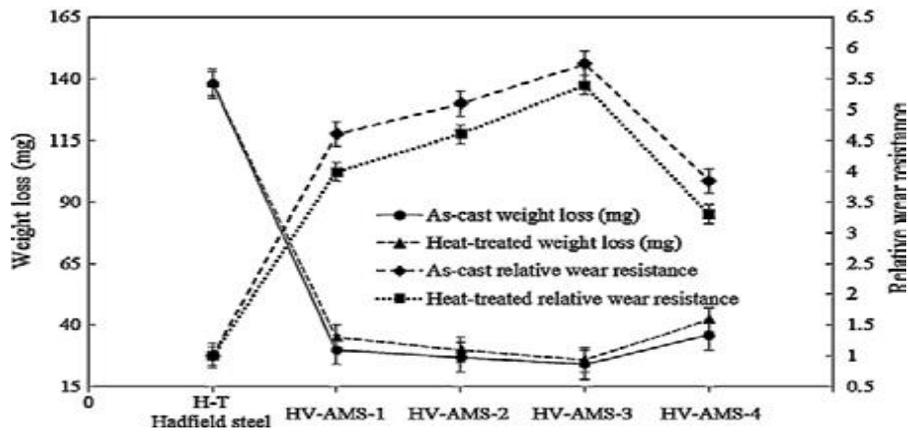


Figure 23. Perte de poids et résistance à l'usure des échantillons expérimentés [22]

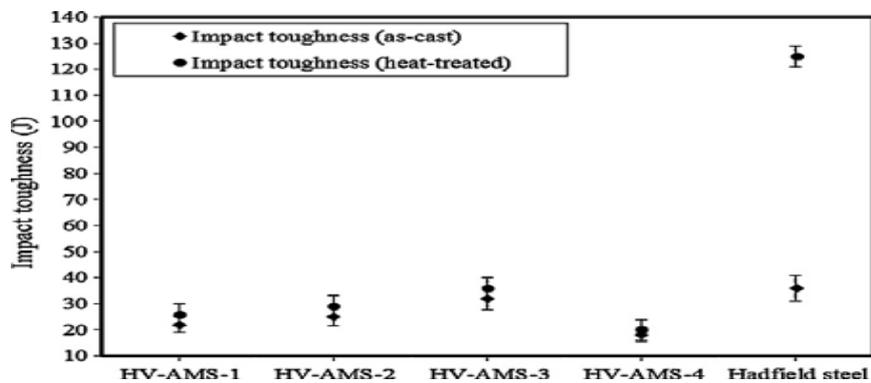


Figure 24. Résistance aux chocs des échantillons expérimentés [22]

III.7. Effet du molybdène

Les études réalisées par Arnson et al [21] traitant l'effet du molybdène ont montré que cet élément retarde la transformation de l'austénite à haute teneur en manganèse, favorise le développement de fins carbures globulaires, augmente la dureté et il favorise la transformation martensitique des austénites métastables. Gouin [22] a étudié l'effet combiné du molybdène et du traitement thermique sur l'acier Hadfield. Ses résultats montrent que la résistance à l'usure de l'acier Hadfield allié à 1% Mo sans traitement thermique est comparable à celle de l'acier Hadfield standard avec traitement thermique.

CHAPITRE IV

**EFFET DES TRAITEMENTS THERMIQUES SUR LA
MICROSTRUCTURE ET LES PROPRIETES MECANQUES
DE L'ACIER HADFIELD**

VI. Effet du processus des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield.

Il est bien connu que l'acier Hadfield ayant une structure composée d'austénite et des carbures aux joints de grains, ce qui rend cet acier un matériau fragile pour (à l'état brut de coulée). Afin de résoudre ce problème, Sabzi et al [23] ont montré que si on trempe l'acier Hadfield dans un bain d'eau salée, on peut éviter la formation de réseau de carbure fragilisant l'acier. Lorsque la quantité de sel dans la solution de trempage augmente, l'intensité de refroidissement de cette solution augmente, ce qui empêche la formation d'une grande quantité de carbures.

Dans une partie de leurs études, un certain nombre de chercheurs ont étudié l'effet de la température du recuit et ont montré qu'avec l'augmentation de la température et du temps de ce processus, la quantité de inclusions dans la microstructure de ces aciers diminue. Les températures proposées par Sabzi et al [23], dans le but d'assurer de meilleures propriétés mécaniques pour l'acier austénitique au manganèse Hadfield, sont comprises entre 900°C et 1150°C.

Dans le cadre d'étudier l'effet des paramètres du traitement thermique sur les propriétés mécaniques, les précipitations, la durée de vie en fatigue et le mode de fracture de l'acier Hadfield, un traitement thermique de mise en solution à une température de 1100°C pendant 2h suivi d'une trempage à l'eau pure et dans un bain de sel à 3% NaCl a été appliqué [25].

Les résultats ont montré que la microstructure de l'échantillon trempé dans le bain de sel contient plus de précipités de Mn_3C . Cet échantillon présente également de faibles dureté et résistance à la traction comparativement à l'échantillon trempé à l'eau. Alors que sa durée de vie en fatigue est la plus longue. Dans ce cas, le mode de fracture est plus ductile.

VI.1. Influence du traitement thermique sur la microstructure

La figure 25 montre des micrographies optiques d'un échantillon en acier Hadfield à l'état brut de coulée figure 25 (a), trempé à l'eau pure figure 25 (b) et trempé dans un bain de sel à 3% NaCl figure 25 (c). Comme on peut le voir sur cette figure, la microstructure de l'acier considéré à l'état brut de coulée (figure 25 (a)) consiste en une matrice austénitique avec un réseau continue de carbure. L'application d'un traitement thermique à 1100°C pendant 2 heures a réduit la quantité de carbures dans la microstructure (figure 25(b)).

Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

L'échantillon trempé dans le bain de sel montre une taille des grains de $118 \mu\text{m}$, tandis que celui trempé à l'eau pure présente une taille des grains de $94 \mu\text{m}$. Le pourcentage de carbures dans les échantillons trempés à l'eau et trempés au bain de sel était de $13,9 \pm 0,2$ et $5,8 \pm 0,2$, respectivement. Il est important de mentionner que les résultats obtenus dans cette étude, concernant l'effet du bain de sel sur la microstructure et la distribution du carbure, correspondent bien aux résultats de Hosseini et al [24].

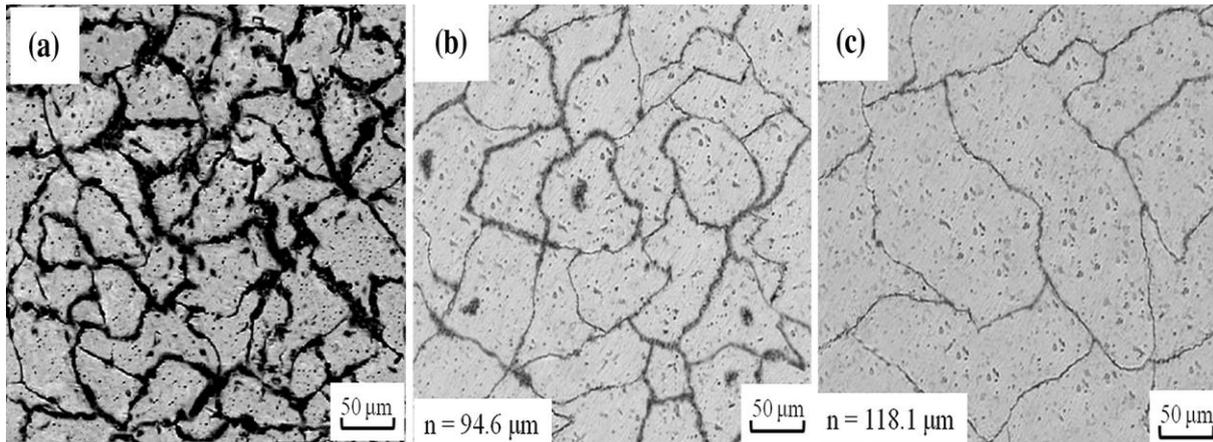


Figure 25. Micrographies optiques des échantillons étudiés à l'état brut de coulée (a), trempé à l'eau pure (b) et trempé dans le bain de sel à 3% NaCl (c) [25]

La figure 26 montre des micrographies MET des échantillons trempés à l'eau pure avec un bain de sel à 3% NaCl. La quantité de carbures dans l'échantillon trempé à l'eau pure est plus élevée. De plus, en raison de la vitesse de refroidissement du bain de sel, les dislocations sont plus visibles sur sa micrographie.

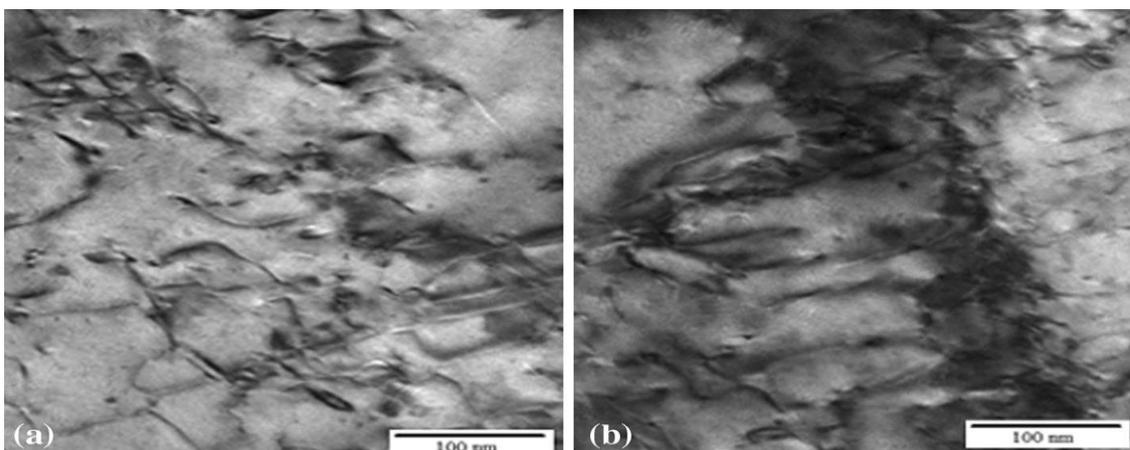


Figure 26. Microscopie électronique en transmission (MET) des aciers Hadfield trempés : (a) à l'eau pure, (b) dans le bain de sel à 3% NaCl [25]

VI.2. Influence du traitement thermique sur les phases existantes dans l'acier Hadfield

La figure 27 montre les diffractogrammes X pour les deux échantillons de l'acier Hadfield étudié. L'austénite est la phase la plus dominante dans les deux échantillons, ce qui confirme les résultats de la microscopie expliqués précédemment.

On peut également voir que le carbure Mn_3C est le principal carbure formé dans les deux échantillons avec une différence d'intensité du pic. La quantité de ce carbure est plus faible dans l'acier Hadfield trempé au bain de sel.

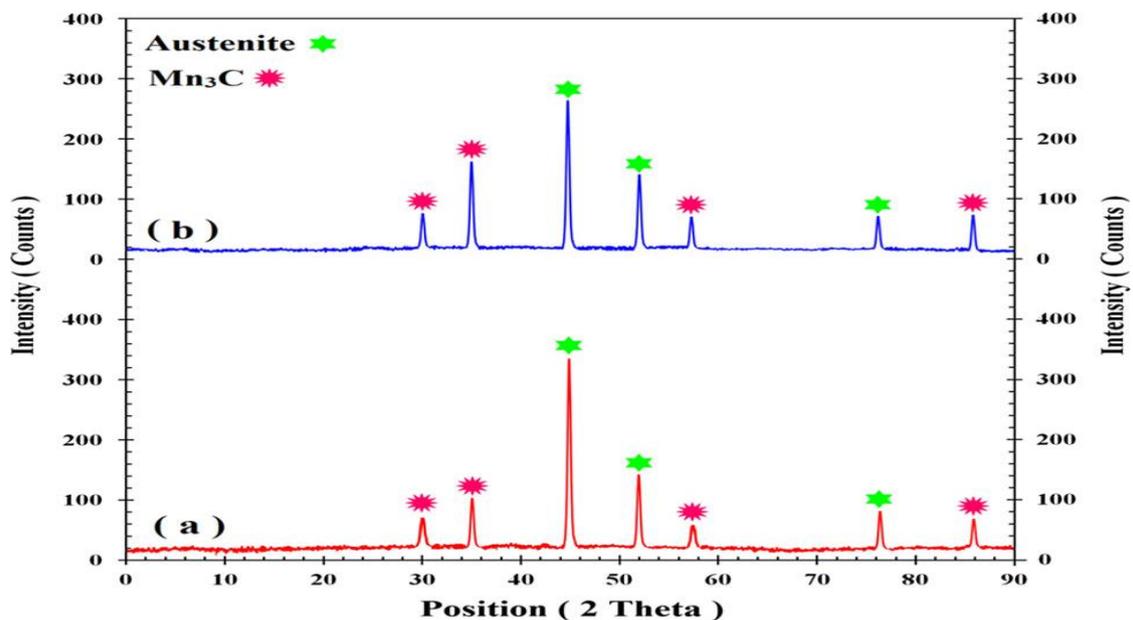


Figure 27. Diffractogrammes X des échantillons étudiés après trempé : dans le bain de sel à 3% NaCl (a), à l'eau pure (b) [25]

VI.3. Influence du traitement thermique sur le comportement en traction

La figure 28 montre les résultats des essais de traction pour les deux échantillons. L'échantillon trempé à l'eau pure a une meilleure résistance à la traction mais une faible ductilité par rapport à l'échantillon trempé dans le bain de sel. Ceci est dû à la faible taille de grain et la quantité élevée de carbures dans l'échantillon trempé à l'eau pure.

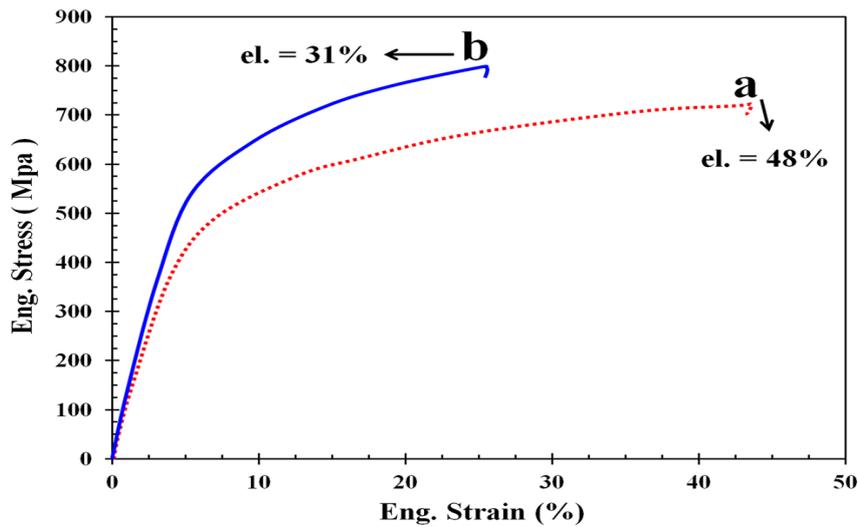


Figure 28. Courbe de traction des échantillons étudiés après trempé : dans le bain de sel à 3% NaCl (a), à l'eau pure (b) [23]

VI.4. Influence du traitement thermique sur la dureté

Les valeurs de dureté Vickers pour les aciers Hadfield trempés à l'eau et au bain de sel sont de $236,4 \pm 4,31$ et $188,7 \pm 3,09$ HV, respectivement.

En outre, il a été constaté d'après les résultats de microscopie que l'échantillon trempé dans bain de sel contient moins de carbures que l'échantillon trempé à l'eau pure. Par conséquent, la présence d'une quantité plus grande de carbure est une raison pour une dureté plus élevée dans l'échantillon trempé à l'eau pure comparée à celle trempée dans le bain de sel, ce qui confirme les résultats de dureté de cette recherche et qui correspondent bien aux résultats de Hosseini et al [24].

VI.5. Influence du traitement thermique sur la résistance à la fatigue

L'échantillon trempé dans le bain de sel montre une meilleure résistance à la fatigue dans toutes les contraintes appliquées par rapport à l'échantillon trempé à l'eau pure (figures 29). De plus, la résistance à la fatigue de l'acier Hadfield trempé à l'eau est d'environ 400 MPa, ce qui est compatible avec les résultats rapportés par Kang et al [27].

Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

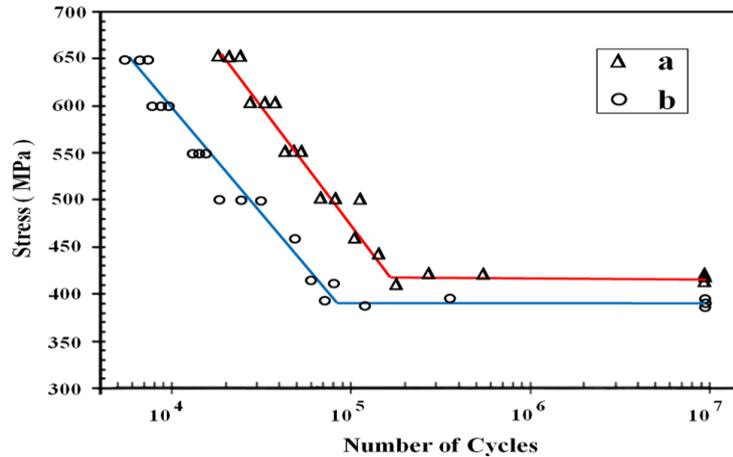


Figure 29. Résultats des tests de fatigue des échantillons étudiés après trempe : dans le bain de sel à 3% NaCl (a), à l'eau pure (b) [27]

VI.6. Effet du traitement thermique à double solution sur les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield à haute teneur en manganèse

Afin d'étudier l'effet de traitement thermique à double solution sur l'évolution des propriétés mécaniques, des changements microstructuraux et de la dureté de l'acier Hadfield à haute teneur en manganèse (17,5% en poids), Mahboobeh et al [28] ont appliqué différents environnements de trempe. La composition chimique de l'acier utilisé est donnée par le tableau 8. La teneur en manganèse de l'échantillon considéré est de 17,5%.

C,%	Mn,%	Cr,%	Si,%	Mo,%	P,%	S,%
1.2	17.5	1.7	0.3	0.3	0.03	0.04

Tableau 8. Composition chimique d'éprouvettes expérimentées [28]

L'échantillon considéré a subi deux cycles de traitement thermique. Le premier cycle consiste à chauffer l'échantillon à 620°C et le maintenir à cette température 20 min puis l'austénitiser à 1050°C pendant 20 min et à la fin le tremper à l'eau (chauffée à 40°C). Le deuxième cycle consiste à placer les échantillons dans un four déjà chauffé à 1050°C ou 1100°C. De cette façon, l'effet du premier cycle pouvait être maintenu. Les échantillons N°1 et N°6 sont refroidis dans divers environnements de trempe comme indiqué dans le tableau. L'échantillon N°8 a été chauffé et refroidi dans le four. Le schéma des cycles de traitement est montré par la figure 30.

Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

N° Echantillons	T sol, °C	T sol, heure	Environnement	T env, °C
N°1	1050	1	Eau + 0% en poids de sel	25
N°2	1050	1	Mélange d'eau et de glace + 0% en poids de sel	0
N°3	1050	1	Eau + 1,5% en poids de sel	25
N°4	1050	1	Eau + 3% en poids de sel	25
N°5	1100	1	Eau + 0% en poids de sel	25
N°6	1100	1	Eau + 3% en poids de sel	25
N°7	-	-	-	-
N°8	1050	1	Four	-

Tableau 9. Echantillons étudiés avec différentes procédures de traitement thermique. T sol : Température de la mise en solution, T sol : Temps de la mise en solution, T env : Température ambiante de trempe [28]

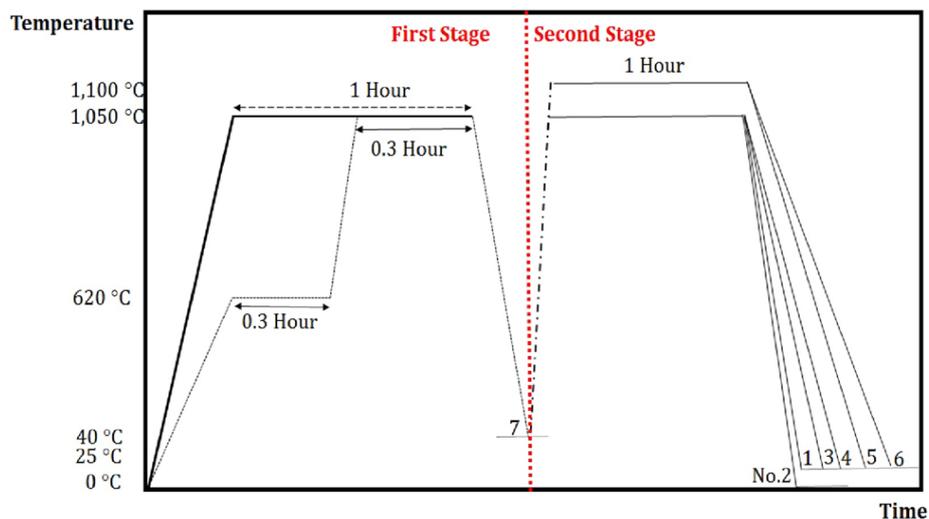


Figure 30. Processus de traitement thermique pour appliqués sur différents échantillons [28]

VI.7. Microstructures obtenues

La microstructure de l'éprouvette N°7 après la première étape du traitement thermique est montrée par la figure 31. Cette microstructure est composée d'une matrice austénitique, de carbures (zones blanches) et des d'inclusions (zones noires).

Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

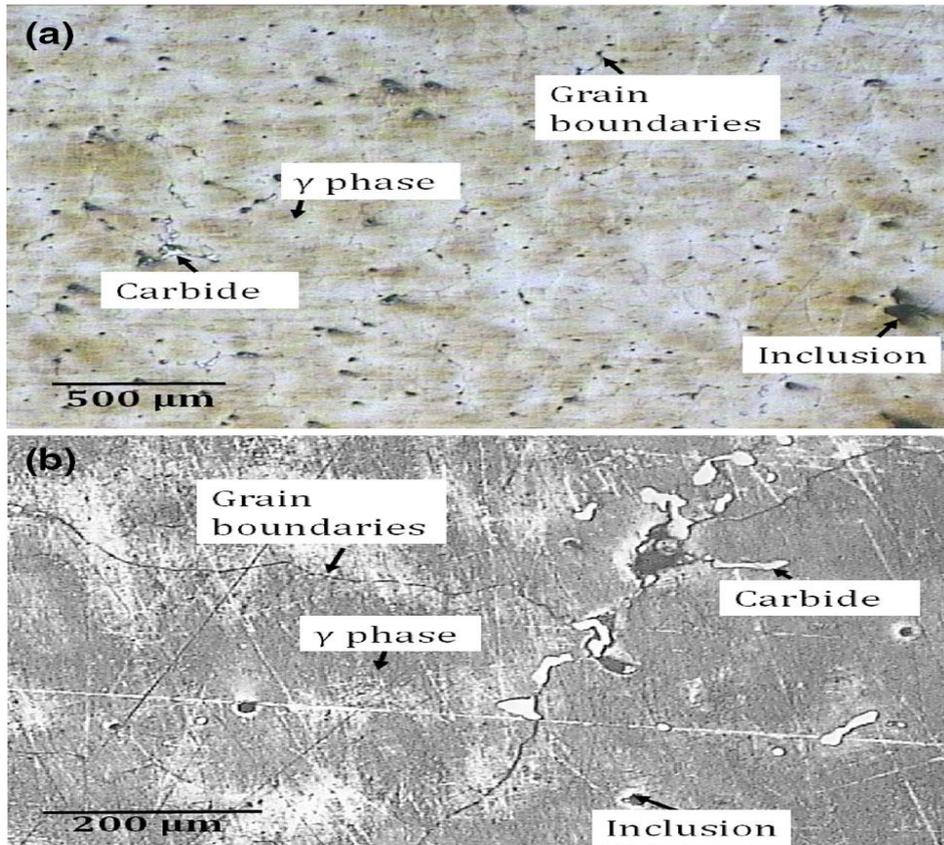


Figure 31. Microstructure d'échantillon N°7 avec deux grossissements: a) 50 X et b) 200 X [28]

Les micrographies MEB et les analyses EDS sont présentées par les figures 32 et 33 respectivement.

La figure 32 (a) montre une microstructure composée d'une matrice austénitique dont laquelle se trouve deux phases inter et intragranulaires. Les résultats EDS ont détecté la composition chimique de ces phases : la zone noire (B) est des inclusions de sulfure et la zone la plus sombre (A) sont des carbures. Ces derniers peuvent être des carbures $(Fe,Mn)_3C$ ou de chrome. Ce résultat a été également observé dans d'autres recherches [28].

Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

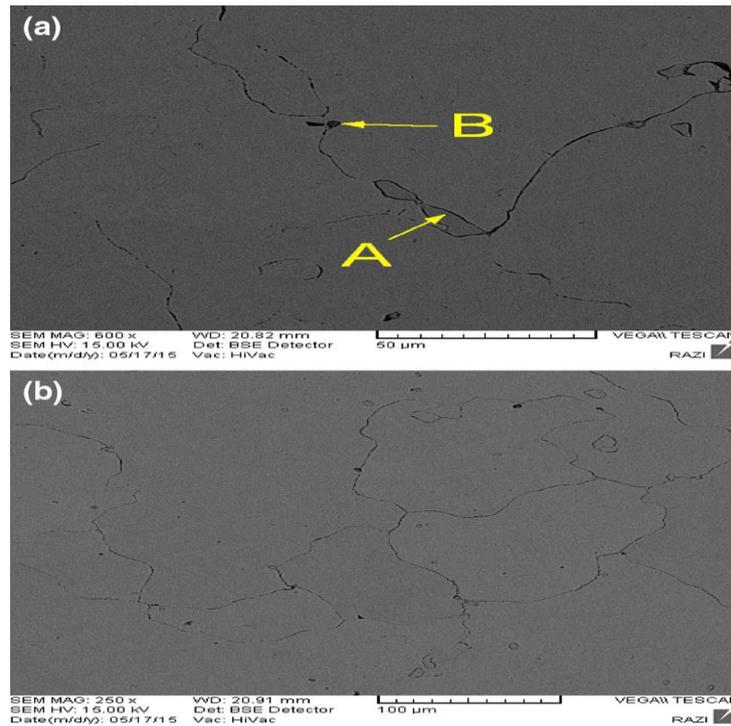


Figure 32. Résultats MEB de l'échantillon N°7 avec deux grossissements
(a) : 50 µm et (b) : 100 µm [28]

Le tableau 10 représente la dureté et la taille moyenne des grains pour tous les échantillons. L'échantillon N°7 a une taille moyenne des grains de 175 µm. Cette valeur est légèrement plus grande que celles obtenues dans d'autres recherches [29].

Echantillons	Dureté HRB	Taille moyenne des grains µm
1	98.8	166 ± 3
2	95.4	115 ± 3
3	94.9	160 ± 3
4	96.4	150 ± 3
5	92.1	145 ± 3
6	93.2	130 ± 3
7	97.5	175 ± 3
8	99.3	190 ± 3

Tableau 10. Dureté et taille moyenne des grains des différents échantillons [28]

Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

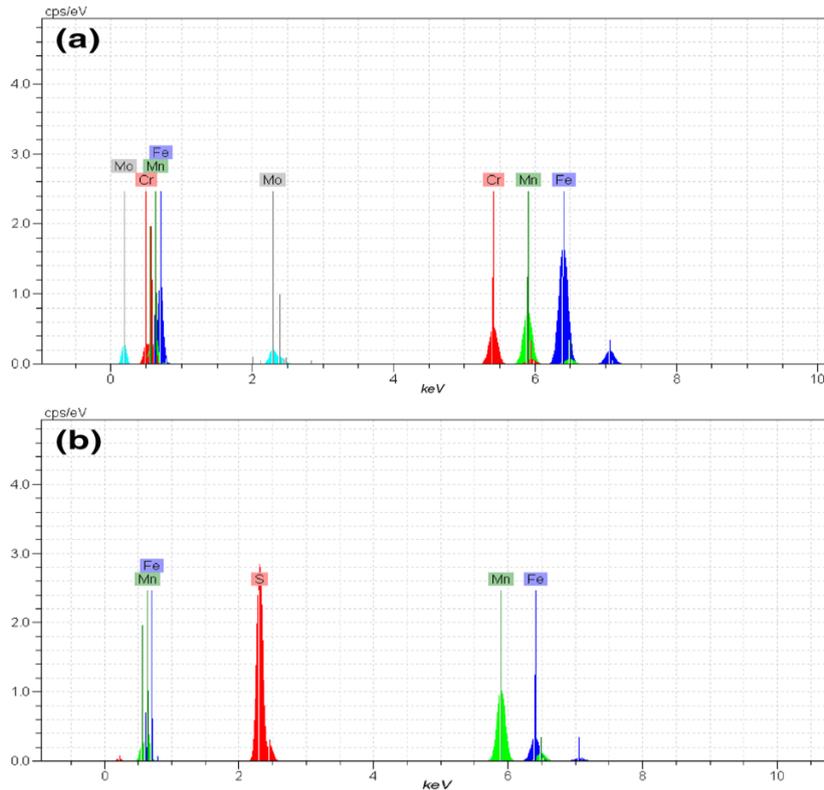


Figure 33. Résultats EDS de l'échantillon N°7 dans les points A et B [28]

La microstructure de l'échantillon N°2 est montrée par la figure 34(b). Lorsque la température de l'environnement de trempe est passée de 25 à 0°C, la taille moyenne des grains a diminué à 115 μm (échantillon N°4).

L'augmentation de la température de la mise en solution de 1050 à 1100°C pour les échantillons N°5 et N°6 a provoqué une distribution non uniforme des inclusions par rapport à l'échantillon N°4.

Au cours la première étape du traitement thermique, plusieurs fissures (figure 27(f)) ont été observé sur la surface de l'échantillon N°6 par rapport aux autres échantillons. D'autre part, la dureté de l'échantillon N°6 est plus élevée que celle de l'échantillon N°5 (due à la diminution de la taille des grains de 145 à 130 μm).

Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

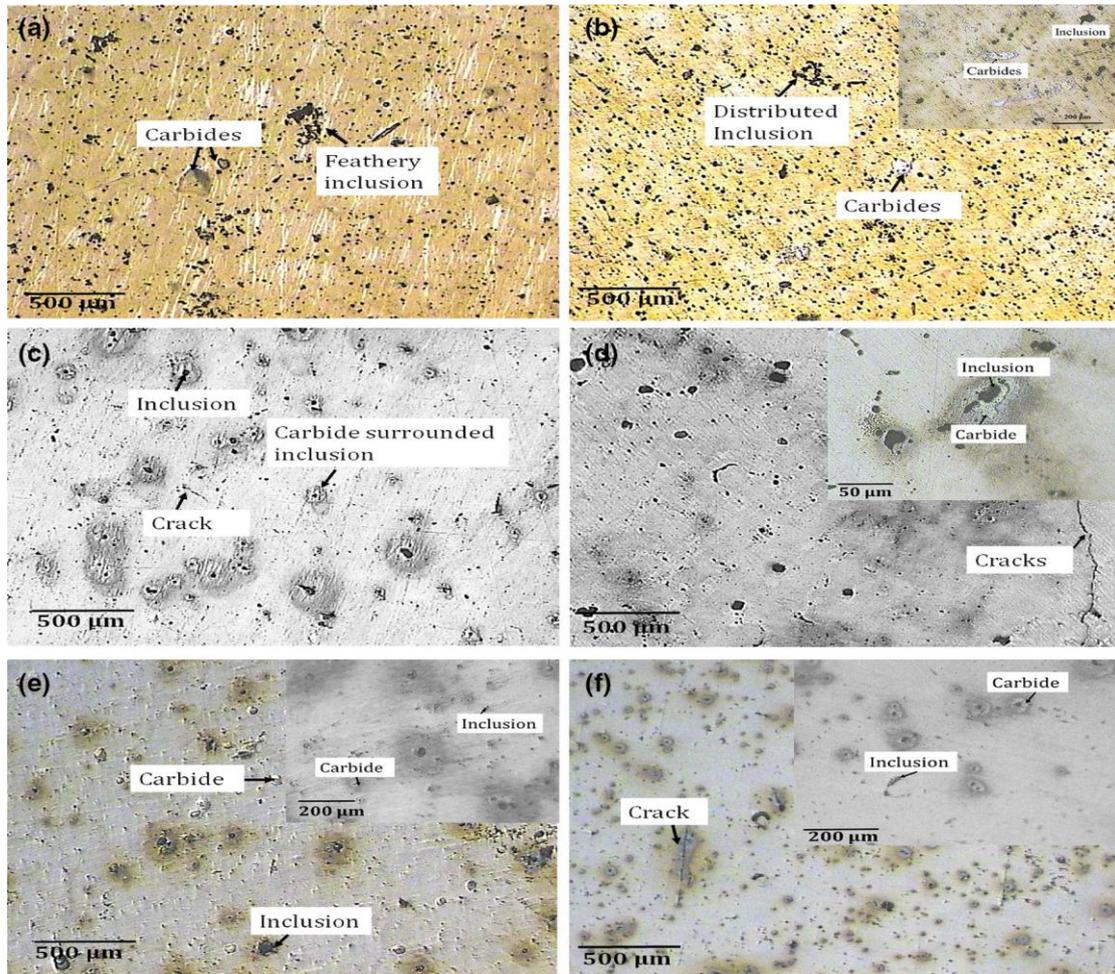


Figure 34. Microstructure de l'échantillon N°1 (a), échantillon N°2 (b), échantillon N°3 (c), échantillon N°4 (d), échantillon N°5 (e) et échantillon N°6 (f) [28]

La microstructure de l'échantillon N°8 est composée d'une matrice austénitique avec plus de carbures et d'inclusions (figure 35). La taille des inclusions de sulfures est devenue plus grande avec une nouvelle morphologie sphérique.

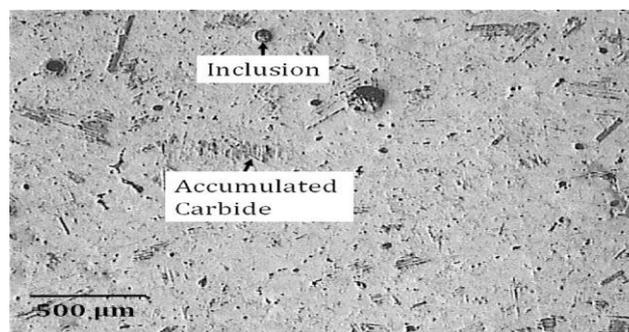


Figure 35. Microstructure de l'échantillon N°8 [28]

Effet des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'acier Hadfield

La dureté (HRB) et la taille moyenne des grains (μm) des différents échantillons ont été exprimé par rapport au sel contenu dans l'environnement de trempe. Comme le montre la figure 36, la courbe de la taille moyenne des grains et la dureté diminuent avec l'augmentation de la teneur en sel dans l'environnement de trempe pour les deux températures de solution (1050 et 1100°C). L'environnement qui n'a causé aucune fissure sur la surface de l'éprouvette ni une diminution de la dureté et de la taille de grain austénitique est considéré comme le milieu de trempe le plus adéquat pour cet acier Hadfield.

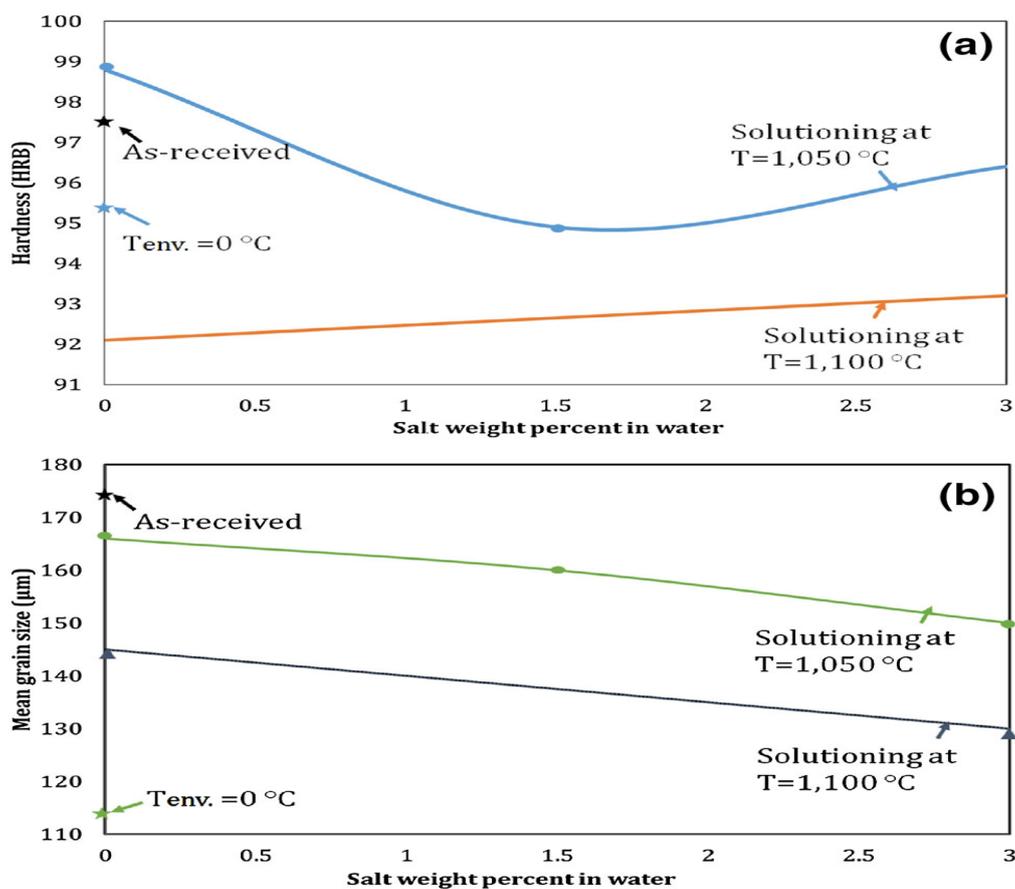


Figure 36. Dureté (HRB) (a) et la taille moyenne des grains austénitiques (b) en fonction du pourcentage du sel dans le bain des échantillons étudiés [28]

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION

Après un certain nombre d'expériences effectuées et publiées par plusieurs chercheurs sur l'acier Hadfield, on peut conclure que cet acier qui possède une structure austénitique avec des carbures à l'état brute de coulée ayant des propriétés distinctives qui lui permet d'être présent dans plusieurs domaines qui exigent une dureté et résistance à l'usure importantes. Sa microstructure et ses propriétés mécaniques sont remarquables grâce aux deux éléments de base le carbone et le manganèse. Ces caractéristiques peuvent être changées et améliorées par l'ajout des éléments d'addition à caractère carburigène comme le chrome. Ce dernier conduit à la formation des carbures complexes de $(Fe,Mn,Cr)_{23}C_6$, ce qui favorise une amélioration de la résistance à l'usure de l'acier Hadfield. Le titane rend les grains austénitiques de cet acier aussi fins que possible et augmente sa résistance à l'usure jusqu'à 40%. L'effet combiné du titane et de l'azote assure une meilleure résistance au choc. Le vanadium forme des carbures et favorise une augmentation de la valeur de dureté d'environ 60% et par conséquent l'augmentation de la résistance à l'usure. L'acier Hadfield contenant du Nb a une résistance plus élevée, une haute plasticité et des grains plus fins en comparaison avec l'acier Hadfield sans Nb. Le molybdène à son tour améliore la dureté de l'acier Hadfield. D'autres éléments alphas (silicium) ont marqué un changement de la morphologie du carbure Fe_3C , ce qui affecte la dureté de l'acier Hadfield.

Le traitement thermique est un autre paramètre affectant la microstructure et les propriétés de cet acier. Il permet de réduire la quantité des carbures dans la microstructure. En s'appuyant sur les résultats de cette étude, on a constaté que le milieu de trempe (l'eau pure ou bain de sel) a un impact considérable sur l'acier Hadfield. Lorsque la quantité de sel dans la solution de trempe augmente, l'intensité de refroidissement de cette solution augmente, ce qui empêche la formation d'une grande quantité de carbures.

Références bibliographiques

- [1] Subramanya, D.K., A.E. Swansiger and H.S. Avery, ASM Metals Handbook, 1: 822-840.
- [2] Grube and H.J. Chapin, 1985. "Austenitic Manganese Steel Castings", 9th Edition, ASM Metals Handbook, 9: 251-256.
- [3] N.Tsujimoto, "Casting Practice of Abrasion Resistant Austenitic Manganese Steel", 1978.
- [4] Malkiewicz, T. (1976). Metal science. Warszawa-Kraków: PWN. (in Polish).
- [5] Zharov, A.I., Rybalko, F.P. and Mikhalev, M.S., "The Work Hardening of Hadfield Steel", Phys. Met. Metall., 202, 38, 1974.
- [6] Dastur, Y.N. and Leslie, W.C., "Mechanism of Work Hardening in Hadfield Manganese Steel", Metall. Trans. A, 749, 12A, 1981.
- [7] I.Elmahallawi, R.Abdolkarim, and A.Naguib, "Evaluation of Effect of Chromium on Wear Performance of High Manganese Steel", Mater Science and Technol, 2001, Vol. 17, pp. 1385-1390
- [8] Yan W et al. "Microstructural Characterization of Hadfield Austenitic Manganese Steel", Materials Sciences, 2008, Vol. 43, pp.5654-5658.
- [9] Krawiarz, J. & Magalas, L. (2005). Modified cast Hadfield steel with increased abrasion resistance. Przegląd Odlewnictwa. 10, 666.
- [10] Tęcza, G. & Głównia, J. (2015). Resistance to abrasive wear and volume fraction of carbides in cast high-manganese austenitic steel with composite structure. Archives of Foundry Engineering. 15(4), 129-133.
- [11] Sasaki, T., 1982. "Physical and Mechanical Properties of High Manganese Non-Magnetic Steel and its Application to Various Products for Commercial Use", Transactions ISU, 22: 184-192.
- [12] I.Elmahallawi, R.Abdolkarim, and A.Naguib, "Evaluation of Effect of Chromium on Wear Performance of High Manganese Steel", Mater Science and Technol, 2001, Vol. 17, pp. 1385-1390.
- [13] Chakrabarti, S. Choice of material for wear parts of crushing and grinding equipment

Références bibliographiques

- [14] Agunsoye et al, High-Mn Steel for casting Exposed in subzero conditions”2001.
- [15] Bagher et al, “effet of Ti And Al Addition on MnS Impurities in Steels” ,2005 Steel conference, Yazd, Iran, pp.193-211.
- [16] Siafakas. (2016). Changes in Impact Strength and Abrasive Wear Resistance of Cast High Manganese Steel Due to the Formation of Primary Titanium Carbides. 16(4), 163-168
- [17] Akeel et al et al Influence of Hadfield’s steel chemical composition on its mechanical properties. pp 430-432
- [18] Moghaddam, E.G., Varahram, N. & Davami, P. The comparison of microstructural
- [19] Ji et al characteristics and mechanical properties of high- vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel. Materials Science and Engineering, A532. Pg.260-266. (2011)
- [20] Moghaddam et al, Effect of Vn content and solution high-Mn steel alloys, J. Chem., 2014(2014), p. 12-13.14.15.
- [21] Sabzi , A. Obeydavi, and S.H.M. Anijdan, The effect of heat treatment on a Hadfield steel, Mech. Adv. Mater. Struct., (2018), p. 1,3,4,10.
- [22] S. Hosseini, M.B. Limooei, M.H. Zade, E. Askarnia, and Z. Asadi, Optimization of heat treatment due to austenising temperature, time and quenching solution in Hadfield steels, Int. J. Chem. Mol. Nucl. Mater. Metall. Eng., 7(2013), No. 7, p. 582.
- [23] X et al, Optimization of surface roughness and flank wear of Hadfield steel with (2014), p. 19.
- [24] S.H.M. Anijdan, M.R. Zadeh, and M. Farzam, The effect of heat treatment on a Hadfield steel 57(2018), No. 3, p. 350.
- [25] Kang et al, Driving force for $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation and stacking fault energy of γ in Fe–Mn binary system, Metall. Mater. Trans. A, 31(2000), No. 2, p. 355.
- [26] S.H.M. Anijdan, M.R. Zadeh, and M. Farzam, The effect of heat treatment on a Hadfield steel 57(2018), No. 3, p. 350.
- [27] Kang et al, Driving force for $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation and stacking fault energy of γ in Fe–Mn binary system, Metall. Mater. Trans. A, 31(2000), No. 2, p. 355.
- [28] Mahboobeh et al, Effect of Dual Solution Heat Treatment on Mechanical Properties of Hadfield High Manganese Steel