

## Effet des Traitements Thermiques sur le Durcissement Structural de l'Acier 316L

Sadek K. <sup>1\*</sup>, Aour B. <sup>2</sup> and Bennouna M. S.

<sup>1</sup> Laboratoire de Biomécanique Appliqué et Biomatériaux /ENPO

<sup>2</sup> Laboratoire de Biomécanique Appliqué et Biomatériaux /ENPO

<sup>3</sup> Laboratoire de Biomécanique Appliqué et Biomatériaux /ENPO

**Abstract.** The oil industry requires materials that withstand temperatures and pressure very specific use, therefore the study of the choice of used material saves the company the cost of repair and maintenance. In the present work we will study a type of steel which is widely used in oil industry, it is the 316L. The purpose of this work is to study the effect of heat treatments on the structural hardening and changes of hardness.

**Keywords:** structural hardening, austenitization, precipitation, annealing, hardening.

**Résumé.** L'industrie pétrolière nécessite des matériaux qui résistent à des températures et pression d'utilisation bien précise, par conséquent l'étude du choix du matériau utilisé fait gagner à l'entreprise des coûts de réparation et de maintenance.

Dans ce présent travail on va étudier un type d'acier largement utilisé en industrie pétrolière qui est le 316L. Le but de ce travail est d'étudier l'effet des traitements thermique sur le durcissement structural et l'évolution de la dureté.

**Mots clés:** durcissement structural, austénisation, précipitation, recuit, trempe.

### 1. Introduction

Contrairement à la connaissance commune que la distribution de la dureté dans les métaux diminue généralement avec l'augmentation des températures, une telle tendance est parfois observée à certaines plages de température de certains métaux. C'est à dire la dureté augmente lorsque la température augmente d'abord et après une valeur critique atteinte, elle diminue avec l'augmentation supplémentaire de la température [1].

Au cours des cinquante dernières années, les aciers inoxydables austénitiques ont été largement utilisés dans de nombreux domaines, allant de nucléaire ou des industries de l'aérospatiale à la chimie ou la nourriture et des boissons [2]. En particulier, acier inoxydable de type 316L a été largement apprécié pour sa grande ductilité et la résistance sous chargements thermomécaniques complexes, c'est à dire, un tel matériau peut atteindre considérablement la déformation plastique de 0,5-1% à des millions de cycles. Cependant, les matériaux tels que les aciers inoxydables 316L ou 304L présentent un comportement complexe caractérisé par primitive et un durcissement secondaire. [3-6].

Le 316L composant en acier inoxydable qui est utilisé en industrie pétrolière et même en biomédical comme un endoprothèse vasculaires [7] vue sa durée de vie importante et ces bonnes caractéristiques mécaniques, physiques ou chimiques.

L'ajout des éléments d'alliage tels que le Cr, Mo, Ni, V, Co ... qui agissent directement sur les points de transformation et la vitesse à laquelle se transforme l'austénite au cours du refroidissement donne aux matériaux une structure bien solide qui lui confère une bonne résistance mécanique à des intervalles de température très élevée.

\* Corresponding author.

E-mail: [sadekkadour@gmail.com](mailto:sadekkadour@gmail.com) (Sadek K.).

Address: Laboratoire de Biomécanique Appliqué et Biomatériaux ENPO, Algeria

Le phénomène de vieillissement sur les aciers inoxydables austénitiques a été observé à des températures élevées et des vitesses de déformation inférieure. [8].

C'est pour cela notre étude à été faite pour des intervalles de température très élevée et à différents temps de maintien pour voir l'évolution de la dureté et de la microstructure de notre matériau.

## 2. l'Acier 316L :

Le présent travail s'intéresse à l'acier austénitique le 316L avec une composition chimique donnée par le tableau 1 :

Tableau 1: Chemical composition (wt%) of 316L austenitic stainless steel.

Élément	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	N
Teneur (%)	0.024	1.86	0.36	0.0045	0.026	11.6	17.2	2.55	-	-

## 3. Fondement théorique

Le but de ce travail est de voir l'effet des éléments d'addition par l'utilisation d'un type d'acier riche en Cr, Mo pour produire divers microstructures avec un large spectre de types de carbures. A travers l'évolution de la dureté, l'observation de la microstructure et les domaines de stabilité fournis par les différents auteurs nous a permis d'identifier les divers carbures mis en jeux de types M<sub>2</sub>C, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> et M<sub>6</sub>C, etc. [9].

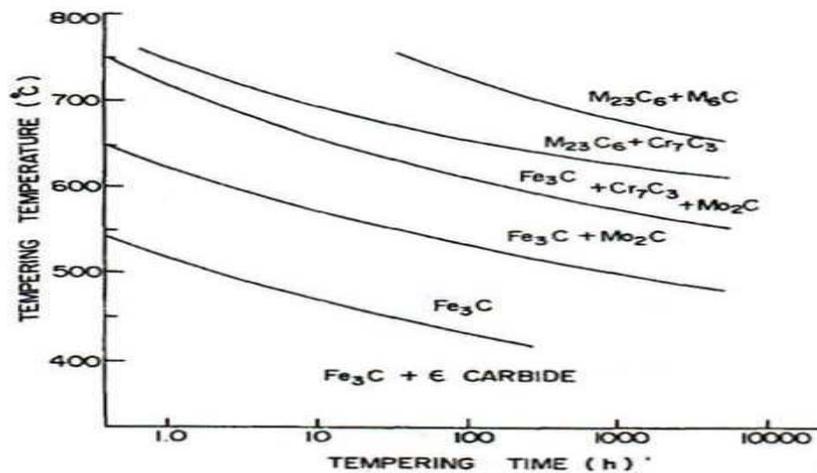


Figure 1. Diagramme de stabilité des carbures du 2.25Cr-1Mo [9].

BAKER et al J ont montré que les carbures sont fortement influencés par la présence d'autres éléments en quantités même faibles tel que Mn, P, Si [10].

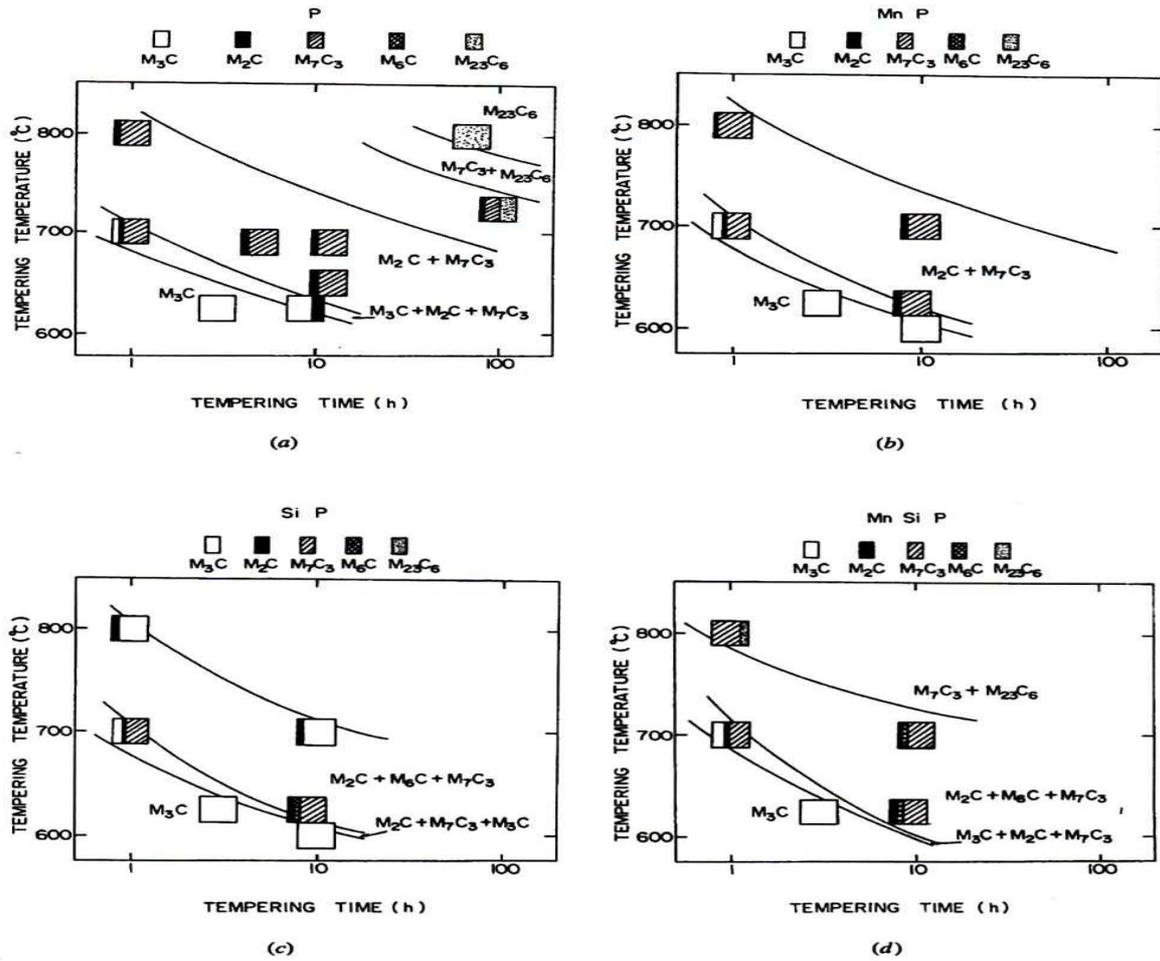
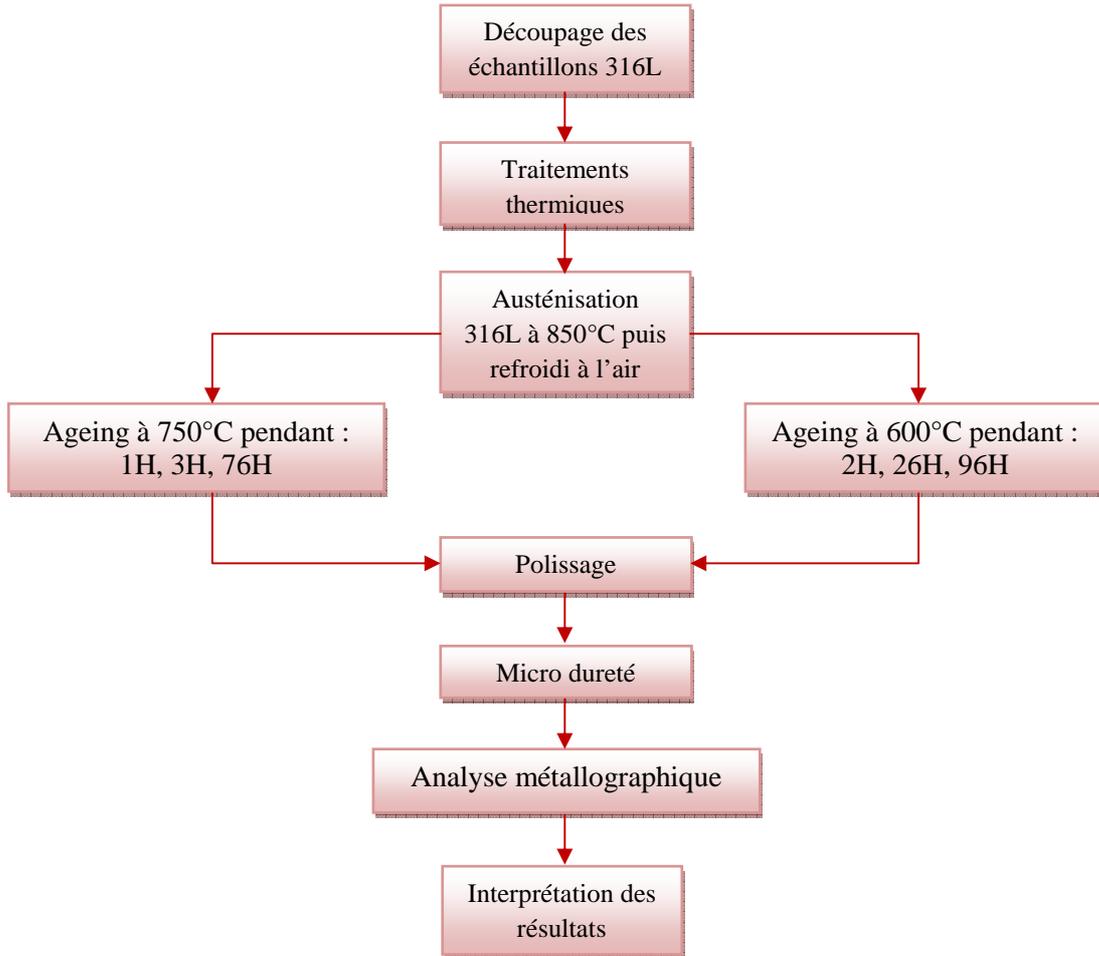


Figure 2. Diagramme de stabilité des carbures des aciers 2.25Cr-1Mo de haute pureté [10] : (a) P, (b) MnP, (c) SiP et (d) MnSiP.

### 3.1 Déroulement de l'étude :

- Les échantillons 316L ont été découpés avec soin, afin d'éviter toute modification structurale.
- Les traitements d'austénitisation et de revenus ont été effectués dans un four programmable avec une température maximale de 1100°C.
- L'austénitisation de tous les échantillons a pour but d'obtenir une phase homogène (dissolution de tous les éléments d'alliages). Les échantillons ont été maintenus à 850°C pendant 30 min, puis refroidis à l'air. Une partie refroidie à l'air. Comme il est résumé sur l'organigramme :



**Figure 3.** Marche à suivre expérimentale.

Après polissage des échantillons et traitement de surface On a utilisé comme solution d'attaque chimique pour la révélation des microstructures l'eau régale avec :

14 cm<sup>3</sup> glycérine, 14 cm<sup>3</sup> HCl, 7 cm<sup>3</sup> HNO<sub>3</sub>

Cette solution d'attaque est utiliser pour la révélation des microstructures des Examen des :

- aciers inoxydables.
- aciers réfractaires.
- aciers du chrome et chrome-nickel
- alliages ferro-chrome.

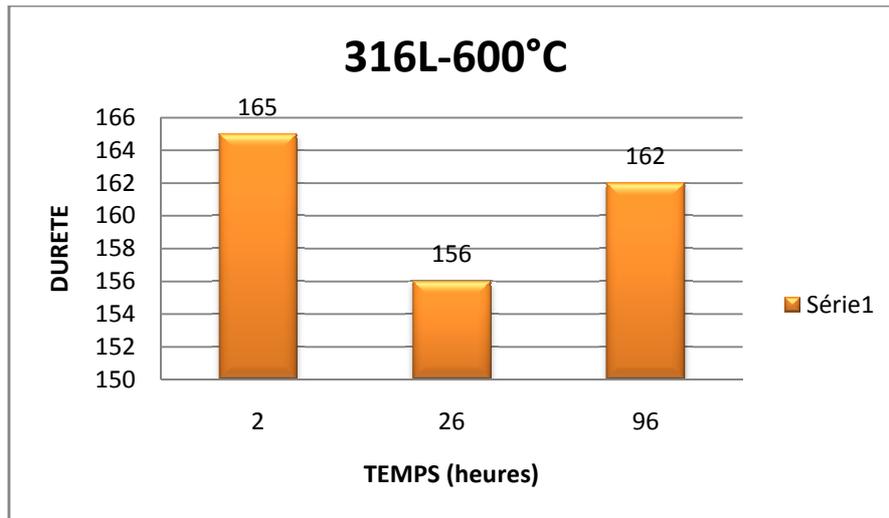


Figure 4. Evolution de la micro durezza du 316L austénisé puis refroidis à l'air à 600°C.

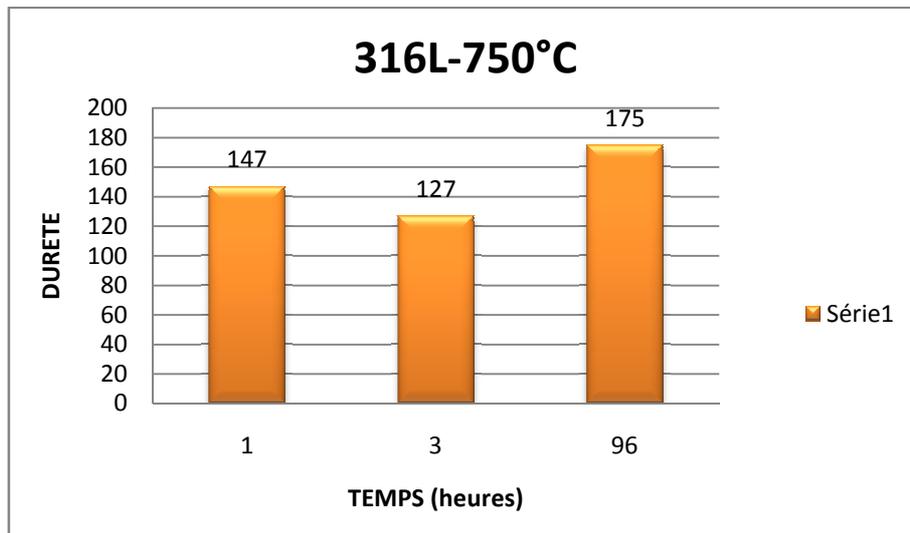


Figure 5. Evolution de la micro durezza du 316L austénisé puis refroidis à l'air à 750°C

### 3.2. Interprétation des résultats :

L'évolution de la micro durezza en fonction du temps se remarquera nettement sur le diagramme, le 316L possède un comportement très particulier. La durezza chute pour ensuite être augmenté après 20 heures à 600°C. A 750°C la chute est à peine perceptible et est due probablement à la formation des carbures  $M_{23}C_7$  stables à haute température. [11]

Pendant le service et dans le champ de température allant de 600°C jusqu'au 700°C, les précipités se forment dans l'acier, ce qui conduit à la modification des propriétés mécaniques de l'acier. [13]

### 3.3 Métallographie et structure:

Les micrographies ayant subies un durcissement secondaire sont considérablement chargées en carbures tant au niveau des joints de grains que dans la matrice. Pour le début du revenu les carbures

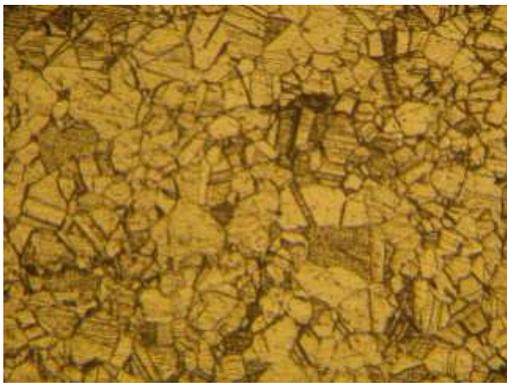
sont finement dispersés pour ensuite coalescer surtout après des temps de maintien au-delà de 96h [11].

La précipitation de  $M_{23}C_6$  se produit d'abord le long de la dislocation de Shookley limitrophe, puis recule à travers la faute d'empilement pour former une lame de carbure sur le plan  $\{111\}$ . La répulsion ultérieure de la dislocation partielle par le précipité peut conduire à une répétition du processus [12].

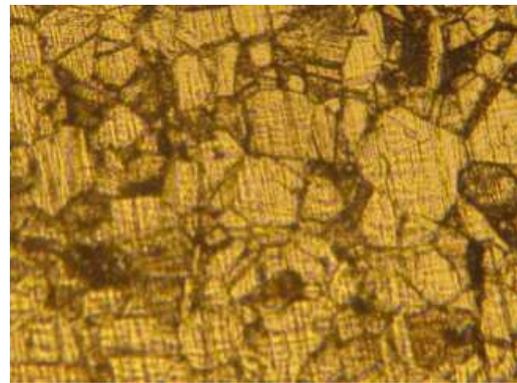
La majeure précipitation de l'austénite est le carbure  $M_{23}C_6$  qui est trouvé après le long temps de maintien à la température de 550°C. [14-16].

Le carbure de chrome riche en  $M_{23}C_6$  qui se forme à 600-900°C est le type de carbure le plus commun des carbures détectés dans ces alliages.

Le carbure  $M_7C_3$  précipite généralement à des températures un peu plus élevée 950°C-1050°C est donc moins fréquent [17-18]

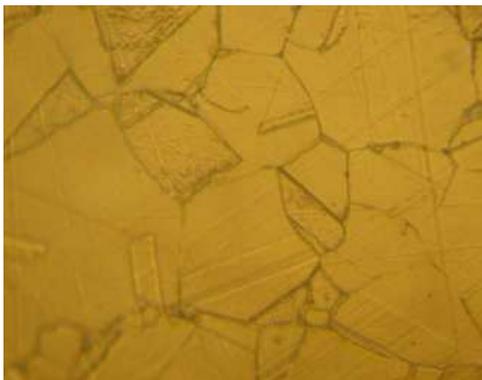


(a) 316L Etat brut

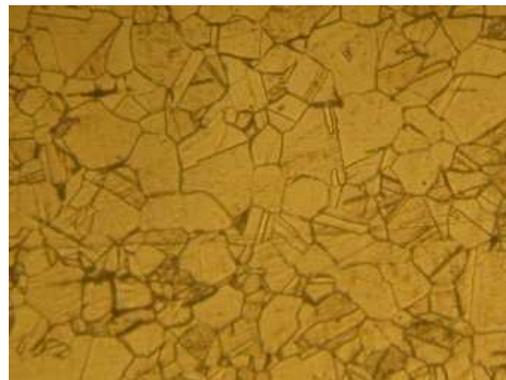


(b) 316L austénité

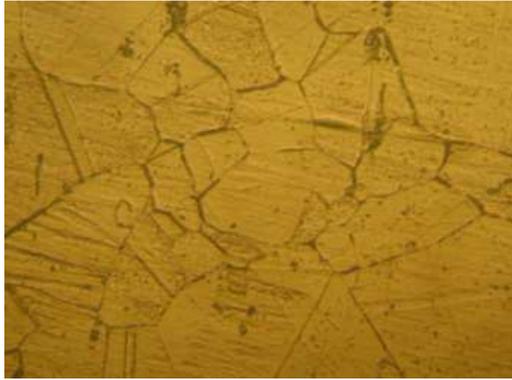
**Figure 6.** Illustration de la structure du 316 L à (a) l'état brut et (b) austénité.



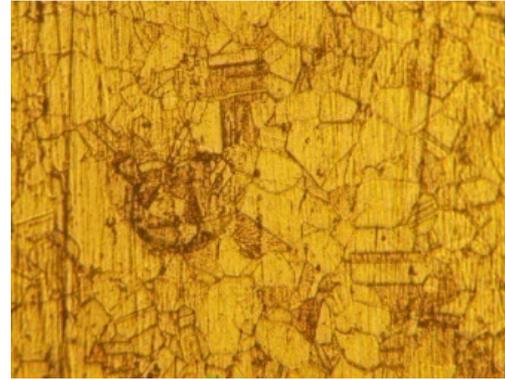
(a) 600°C-2h



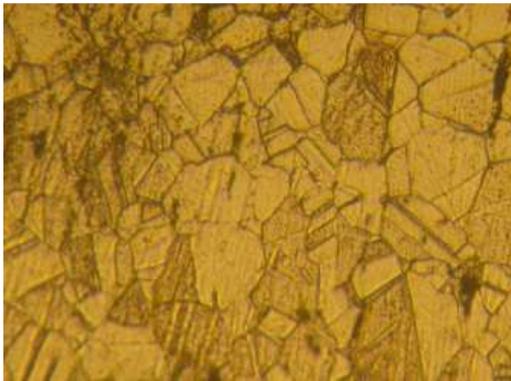
(b) 600°C-26h



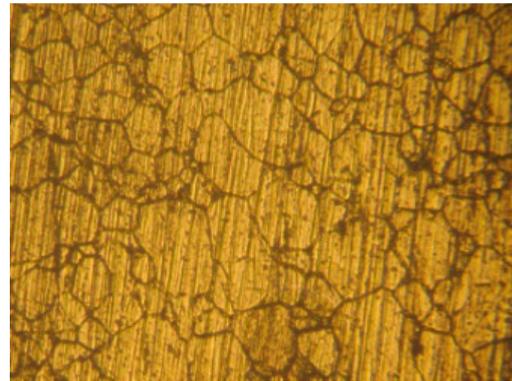
(c) 600°C-96h



(d) 750°C-1h



(e) 750°C-3h



(f) 316L -750°C-96h

**Figure 7.** Ageing du 316L à différentes températures et temps de maintien.

#### 4. Conclusion

L'addition du chrome de 1% à 17% favorise la dissolution du carbure de fer  $Fe_3C$  et augmente la cinétique de formation du carbure riche en Mo de type  $Mo_2C$  pour des additions de 1% à 2.5 %.

Aux températures 750°C et plus la structure d'équilibre est rapidement atteinte avec une nette diminution de la dureté pour des maintiens assez long confirmant la dissolution du  $Mo_2C$  en d'autres carbures plus stables mais très fragiles.

L'étude de l'évolution de la dureté et de la micrographie nous a révélé la cinétique de redistribution des éléments d'alliage. Notre but est de connaître quel est le type de traitement approprié pour augmenter la durée de vie des équipements travaillant à haute température et le dosage à retenir lors de l'élaboration des aciers en éléments tel que le Cr, Mo, V, Ti qui stabilisent le carbure le plus approprié sans pour autant coalescer.[11]

La formation dans l'austénite de précipités en forme de lattes de  $M_{23}C_6$ , adjacents aux interfaces de macles incohérent se forment au niveau des joints et même au niveau des grains pour des températures assez élevée.

Les précipités se forment initialement aux interfaces de macles incohérentes. et on observe ensuite que des boucles de dislocations partielles Shockley ont fait saillie hors des joints. La boucle de dislocation contient une faute d'empilement intrinsèque.[12]

Les aciers non stabilisés comme le 304 et le 316 subissent une précipitation de carbures riches en chrome (du type M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>) lors de vieillissements entre 500°C et 900°C.

Comme cette précipitation s'effectue préférentiellement aux joints de grains, elle conduit à la chute de la teneur en chrome au voisinage des joints.

Cet appauvrissement local en chrome appelé « sensibilisation » conduit au phénomène bien connu de corrosion inter granulaire.

Pour éviter ce problème, les nuances stabilisées et les nuances bas carbone ont été successivement introduites. Les nuances stabilisées contiennent des éléments qui ont une forte affinité avec le carbone (titane pour la nuance 321 et niobium pour la nuance 347). La précipitation de carbures de titane ou de niobium limite la précipitation des carbures de chrome et limite donc également l'abaissement local de la teneur en chrome.[19]

## References

- [1] Jianjun Wang , Wei-Guo Guo , Xiaosheng Gao , Jing Su, The third-type of strain aging and the constitutive modeling of a Q235B steel over a wide range of temperatures and strain rates. 2014 Elsevier, International Journal of Plasticity
- [2] Baddoo N. Stainless steel in construction: a review of research, applications, challenges and opportunities. J Constr Steel Res 2008;64:1199-206.
- [3] Polak J, Obrtlík K, Hajek M. Cyclic plasticity in type 316L austenitic stainless steel. Fatigue Fract Eng Mater Struct 1994;17:773–82.
- [4] Pham M, Solenthaler C, Janssens K, Holdsworth S. Dislocation structure evolution and its effects on cyclic deformation response of AISI 316L stainless steel. Mater Sci Eng A 2011;528(7-8):3261–9.
- [5] Gerland M, Violan P. Secondary cyclic hardening and dislocation structures in type 316 stainless steel at 600C. Mater. Sci. Eng. 1986;84(0):23–33.
- [6] Alain R, Violan P, Mendez J. Low cycle fatigue behavior in vacuum of a 316L type austenitic stainless steel between 20 and 600C. Part I: fatigue resistance and cyclic behavior. Mater Sci Eng A 1997;229:87–94.
- [7] G. Scalet ,Fatigue of 316L stainless steel notched Im-size components F. Auricchio , A. Constantinescu ,
- [8] Gupta, A.K., Singh, S.K., Swathi, M., Gokul, 2012. Prediction of flow stress in dynamic strain aging regime of austenitic stainless steel 316 using artificial neural network, Materials and Design, 35, 589–595
- [9] JIN YU Metalurgical transactions A Volume 20A, August 1989 p. 1561
- [10] BAKER et al J.Iron Steel Int.,1959, vol. 192 p.257
- [11] Raid A,Sadek K et seguer D,thèse ingénieur 2009.usto
- [12] L. K. SINGHAL and J. W. MARTIN, THE GROWTH OF M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> CARBIDE ON INCOHERENT TWIN BOUNDARIES IN AUSTENITE,
- [13] Vach M, Kuniková T, Dománková M, et al Evolution of Secondary Phases in Austenitic Stainless Steels During Long-Term Exposures at 600,650 and 800°C [J]. Materials Characterization, 2008,59(12):1792
- [14] Padilha A F,Escriva D M,Materna G Morris E, et al. Precipitation in AISI 316L (N) During Creep Tests at 550 and 600°C up to 10 Years [J]. J Nucl Mater, 2007,362 (1):132.
- [15] Jesensky M. Structure Stability and Weldability of Stainless Steels [D]. Trnava, Slovakia : MTFSTU,2006.
- [16] Marshall P. Austenitic Stainless Steels ,Microstructure and Mechanical Properties[M]. New York: Elsevier Science Publishing Co .Inc,1984.
- [17] L. H. de Almeida, A.F.Ribeiro,I. Le May Mater.Charact.49.(2003)219–229.
- [18] S. Borjali, S.R .Allahkaram, H.Khosravi Mater.Des.34.(2012)65–73.
- [19] Quentin AUZOUX « FISSURATION EN RELAXATION DES ACIERS INOXYDABLES AUSTENITIQUES - INFLUENCE DE L'ECROUISSAGE SUR L'ENDOMMAGEMENT INTERGRANULAIRE» thèse doctorat école des mines de paris 2004