



Université Saad Dahleb De
Blida 1 Faculté De
Technologie Département De
Génie Mécanique



Laboratoire D'études Et De Recherche En Technologie Industrielle LERTI

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie

Mécanique Option : Génie Des Matériaux

Thème

*Etude Microstructurale et Tribologique des traitements
Thermochimiques des Aciers à Outil pour Travail à froid
BÖHLER-K100 et BÖHLER-K110*

Encadrée par :

Dr. Haddad.A

Présenté par :

Abderrahmane Lazizi

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH de cette réussite

On remercie nos parents de leurs soutiens durant nos études.

On tient à remercier en premier lieu, et avec toute notre gratitude, notre encadreur l'honorable Dr. HADDAD Adel, qui nous a fait l'honneur de diriger ce modeste travail, pour son soutien, pour le temps consacré avec nous, et pour son aimable encouragement.

On remercie tout le staff de Laboratoire D'études Et De Recherche En Technologie Industrielle LERTI surtout Dr benamor et Dr chiker qui nous a laissé travailler à l'intérieur

On remercie les membres de jury qui nous ont honorés par leurs présences.

Finalement je remercie imane qui m'a aidé dans ce travail et bien sûr mes collègues qui sont présents ici.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma chère mère et père, qui m'ont accompagné dans ce parcours scolaire de 17 ans, et à mes sœurs Salma et Maria, et j'ai hâte de vous voir réussir dans tout ce que vous entreprenez

Résumé :

Il a été procédé à un durcissement superficiel d'un acier à outil pour travail à froid BÖHLER-K100 et BÖHLER-K110 en utilisant un traitement thermochimique de boruration en phase solide à 1000°C (K100) et 1050°C (K110) avec un temps de maintien de 6 heures.

Grâce aux analyses microstructurales, il sera possible de visualiser la structure des couches formées à l'interface de l'acier, et déterminer la nature des éléments qui les composent, ainsi que de comprendre la différence entre le K100 et le K110.

Les analyses mécaniques sont effectuées en utilisant des profils de micro dureté provenant de la surface de l'échantillon, en plus d'un essai tribologique de type pion sur disque.

Les résultats de ces caractéristiques indiquent que le BÖHLER-K110 présente des caractéristiques mécaniques supérieures à celles du BÖHLER-K100.

Abstract :

Surface hardening of a BÖHLER-K100 and BÖHLER-K110 cold working tool steel was carried out using a boron rich thermochemical treatment at 1000°C. (K100) and 1050°C. (K110) for 6 hours.

Due to the microstructural analyzes, it became possible to visualize the structure of the layers formed at the interface of the steel, and determine the nature of the elements that compose them, as well as to understand the difference between the K100 and the K110.

The mechanical analyzes are carried out using micro hardness profiles from the surface of the sample, in addition to a tribological test of the pawl type on disk.

The results of these characteristics indicate that the BÖHLER-K110 has mechanical characteristics superior to those of the BÖHLER-K100.

ملخص

تم إجراء النصلب السطحي لبولرك 100 وبولرك 110 باستخدام معالجة صلابة عند 1000 درجة ك-100 (و 1050 درجة) و 1050 درجة ك-110 (لمدة 6 ساعات

بسبب التحللات المجهرية ، أصبح من الممكن تصور بنية الطبقات المتكوزة ني واجهة النوالذ ، وتحديد طبيعة العناصر التي تتكون منها ، وكذلك نمم النرق بين ك 100 و ك 110

تم إجراء التحليلات الميكانيكية باستخدام ملينات تعرف الصلابة الدقيقة من سطح العينة ، بالإضافة إلى اختبار الإحناك. زوعه بيدي على الفرص

نتائج هذه الخصائص تشير إلى أن بولرك 110 له خصائص ميكانيكية مبنوثة على تلك الموجودة ني بولرك 100

تم إجراء النصلب السطحي لبولرك 100 وبولرك 110 باستخدام معالجة كيمياء حرارية صلابة عند 1000 درجة ك-100 (و 1050 درجة) ك-110 (لمدة 6 ساعات

Sommaire

Chapitre 1

Introduction	3
1. Classification des aciers.....	3
1.1 Les aciers au carbone:	4
1.1.1 Les aciers calmés.....	4
1.1.2 Les aciers effervescents.....	4
1.1.3 Les aciers semi-calmés	4
1.2 Les aciers inoxydables	4
1.2.1 Les aciers inoxydables austénitiques	5
1.2.2 Les aciers inoxydables Martensitique	5
1.2.3 Les aciers inoxydables ferritiques	6
1.2.4 Les aciers inoxydables austéno-ferritique.....	6
1.3 Les aciers à outils	6
1.4 Les aciers au carbone pour travail à froid	7
1.5 Les aciers alliés pour travail à froid	7
1.5.1 Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium.....	8
1.5.2 Aciers au chrome	8
1.5.3 Aciers au chrome-molybdène.....	9
1.5.4 Aciers au chrome-tungstène.....	9
1.5.5 Aciers au nickel-chrome	9
1.6 Les aciers pour travail à chaud.....	9
1.7 Les aciers à coupe rapide.....	10
Conclusion	11

Chapitre 2

Introduction	13
1 Définition.....	14
2 La cémentation	15
2.1 Les différents types de Cémentation.....	15
2.1.1 Cémentation solide:	15
2.1.2 Cémentation gazeuse:.....	15
2.1.3 Cémentation par des agents liquides:.....	16
3 La carbonituration	17
3.1 La carbonituration en phase gazeuse	17
3.2 La carbonituration en phase solide	17

4 La nitruration	17
4.1 Techniques de nitruration	17
4.1.1 La nitruration liquide.....	18
4.1.2 Nitruration ionique	18
5 Boruration	18
5.1 La boruration en milieu gazeux.....	19
5.1.1 Le diborane(B ₂ H ₆)	19
5.1.2 Composés organiques à base du bore.....	19
5.1.3 Les halogénures du bore (BF ₃ , BCl ₃ ou BBr ₃)	19
5.2 La boruration en milieu liquide.....	19
5.3 La boruration en milieu solide	20
5.3.1 Technique des pâtes	20
5.3.2 Technique des poudres	20
5.4 Avantages de traitement de boruration.....	21
5.5 Résistance à la corrosion des aciers exposés à la boruration	21
6 La dureté.....	21
Conclusion	22

Chapitre 3

Introduction	24
1 Matériau étudié	24
1.1 Composition chimique.....	25
2 Applications industrielles	25
3 Préparation des échantillons.....	26
3.1 Découpage	26
3.2 Polissage	26
4. Traitement thermochimique	27
4.1 Préparation des poudres	27
4.2 Procédé de traitements thermochimiques.....	28
5. Caractérisation microstructurale	28
5.1 Polissage	28
5.2 Attaque chimique.....	28
5.3 Observation microscopique	29
6. Test tribologique Pion-Sur-Disque	30

Chapitre 4

Introduction.....	32
1 Observation microscope optique	32

1.1 La microstructure	32
1.2 Discussion	34
2 Observation de la couche formée	34
2.1 Discussion.....	35
3 Essai tribologique Pion-Sur-Disque.....	35
3.1 Coefficient de frottement.....	35
3.2 Taux d'usure	37
3.3 Expertise de la trace d'usure:	37
3.4 Perte de masse.....	38
3.4.1 Discussion	38
Conclusion Générale	39

Liste des tableaux

Tableau 1: Quelques nuances d'aciers à outils pour travail à chaud sont mentionnées	9
Tableau 2: élément diffusants et traitements thermochimiques	14
Tableau 3: Composition chimique des mélanges des poudres utilisés	21
Tableau 4: Composition chimique (% masse) d'acier BÖHLER-K100 [32]	25
Tableau 5: Composition chimique (% masse) d'acier BÖHLER-K110 [32]	25
Tableau 6: taux d'usure de nos échantillons	37
Tableau 7: la perte de la masse après le test tribologique	38

Liste des figures :

Figure 1: Traitements des surfaces par voie thermique.....	13
Figure 2: BÖHLER-K100.....	24
Figure 3: BÖHLER-K110.....	25
Figure 4: Scie mécanique utilisée SFMO MOUSSAOUI/PRO DISTRIBUTEUR.....	26
Figure 5: polisseuse Minitex 233	27
Figure 6: four électrique marque Nabertherm, Notre cresset est en porcelaine	28
Figure 7: Microscope optique utilisé de type Eclipse LV150N.....	29
Figure 8: Le tribomètre TRB3	30
Figure 9: la microstructure de BÖHLER non traité a l'échelle X100.....	32
Figure 10: la microstructure de BÖHLER non traité a l'échelle X500.....	33
Figure 11: la couche de boruration d'acier K100 traité.....	34
Figure 12: la couche de boruration d'acier K110 traité.....	35
Figure 13: coefficient de frottement des échantillons non traités	36
Figure 14: coefficient de frottement des échantillons traités.....	36
Figure 15: Micrographie de la trace d'usure de l'échantillon K100 non traité.....	37
Figure 16: Micrographie de la trace d'usure de l'échantillon K110 non traité.....	38

Introduction Générale :

Lors de la mise en service, les pièces mécaniques peuvent être exposées à diverses contraintes (frottement, usure, oxydation), pouvant entraîner des dysfonctionnements.

La surface de la pièce est la première à subir des contraintes et des dommages, ce qui a conduit au développement des traitements de surface.

Les traitements de surface sont des opérations mécaniques, physiques et chimiques visant à modifier l'apparence et les propriétés de la surface d'une pièce afin de remplir sa fonction dans des conditions spécifiques.

Il existe de nombreux types de traitements de surface, mais on distingue les traitements thermiques de surface et les traitements thermochimiques comme la boruration et la

Tous les traitements ci-dessus visent à durcir la surface du métal pour obtenir une meilleure résistance à l'usure et au frottement.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux traitements thermochimiques que sont la boruration appliqué aux aciers écrouis BÖHLER – K100 et K110.

Par conséquent, la boruration et la nitruration enrichissent la surface du substrat avec du bore à l'état atomique et du nitruire pour améliorer les propriétés de friction, la résistance à la corrosion et la dureté de la surface des pièces mécaniques.

L'objectif de cette étude est d'évaluer et de comparer les traitements thermochimiques de boruration de l'acier BÖHLER - K100 et K110 à travers des études microstructurales et tribologiques.

Chapitre 1 : Classification des aciers

Introduction :

L'acier est un matériau largement utilisé dans diverses industries, est constitué d'alliages composés de fer, de carbone et d'éléments supplémentaires comme le silicium, le phosphore, le soufre et le manganèse. La présence de carbone, sous forme de carbure de fer (Fe_3C), améliore la dureté et la durabilité de l'acier.

L'acier, alliage métallique principalement composé de fer, contient une quantité variable de carbone, allant de 0,008 % à environ 2,14 % en masse. La teneur en carbone a un impact significatif sur les propriétés de l'acier. Lorsque la teneur en carbone est inférieure à 0,008 %, l'alliage est plus souple et ressemble au fer. A l'inverse, lorsque la teneur en carbone dépasse 2,14 %, la microstructure s'affaiblit du fait de la formation d'inclusions de graphite, entraînant une fusion. Cependant, dans cette plage, l'augmentation de la teneur en carbone améliore la résistance mécanique et la dureté de l'alliage.[1]

Les aciers alliés, qui sont des aciers additionnés d'éléments métalliques, peuvent voir leurs propriétés modifiées. Ces modifications peuvent être encore renforcées grâce à des traitements thermiques, notamment de trempe. Lorsque les aciers subissent de tels traitements, ils sont appelés aciers traités. Les aciers offrent plusieurs avantages par rapport aux autres alliages métalliques. Ils possèdent des propriétés mécaniques exceptionnelles telles qu'un module d'élasticité élevé, une limite élastique, une résistance mécanique, une dureté et une résistance aux chocs. Malgré les progrès réalisés dans de nouveaux matériaux tels que les polymères, les composites et la céramique, les aciers restent le matériau le plus utilisé et le plus développé. La production et la consommation d'aciers sont en constante augmentation.

Ce chapitre fournira un aperçu des aciers et de leurs classifications, avec un accent particulier sur les aciers à outils. [2]

1. Classification des aciers :

L'acier est classé en plusieurs systèmes, en tenant compte de différents paramètres, notamment la composition (telle que l'acier au carbone, l'acier faiblement allié, fortement allié ou l'acier inoxydable) et les méthodes de fabrication. La méthode de classification de l'acier la plus largement utilisée repose sur sa composition chimique. [3]

Trois grands groupes d'aciers alliés sont identifiés et discutés :

- Les aciers au carbone.
- Les aciers inoxydables.
- Les aciers à outils.

1.1 Les aciers au carbone:

Les aciers au carbone (aciers utilisés dans la construction générale) se divisent en deux catégories, les aciers ordinaires et de qualité. Selon les conditions et le degré de désoxydation, il y a trois types de nuances :

les aciers calmés, les aciers effervescents, les aciers semi-calmés

1.1.1 Les aciers calmés :

L'acier calmé est un type d'acier dont l'oxygène a été éliminé pendant la fusion, généralement en ajoutant de l'aluminium, du ferrosilicium ou du manganèse.

1.1.2 Les aciers effervescents :

Ce sont des aciers insuffisamment désoxygénés qui ont un volume non

très peu de FeO. On dit que le métal flotte en raison des gouttes de gaz CO qu'il contient.

Après que le carbone du métal ait été libéré par FeO, il a suivi un chemin différent des autres. La grande quantité des bulles gaz, empêche le développement d'un gouffre. L'acier effervescent est moins cher car sa production est plus coûteuse.

La quantité de matériaux gaspillés est minimisée. Ils ont un haut degré de plasticité, ainsi qu'ils adhèrent bien à la presse à froid

1.1.3 Les aciers semi-calmés :

Ce sont des aciers de transition qui se situent respectivement entre calmés et effervescents. Ils ont aujourd'hui le plus grand nombre d'utilisation. [4]

1.2 Les aciers inoxydables :

La capacité à résister à la corrosion est une caractéristique cruciale des aciers inoxydables, également appelés inox. Ces alliages métalliques présentent un haut niveau de résistance à la détérioration chimique des articles pour lesquels ils sont utilisés.

Le caractère auto protecteur des matériaux corrosifs réside dans leur capacité à créer spontanément un film protecteur à leur surface. Ce film, appelé couche passive, est constitué d'oxydes et d'hydroxydes de chrome et sert à protéger le métal sous-jacent de la

corrosion généralisée et des dommages localisés. Malgré ses dimensions incroyablement fines, mesurant seulement 1,0 à 2,0 nm d'épaisseur, cette couche protège efficacement le substrat métallique.

Le taux de corrosion des aciers inoxydables est minime, le chrome étant l'élément le plus crucial. Cependant, d'autres éléments comme le molybdène et le nickel jouent également un rôle dans la détermination de leur résistance à la corrosion.

Les aciers inoxydables possèdent la capacité de résister à la corrosion et peuvent être classés en quatre groupes distincts, chacun ayant ses propres caractéristiques.[5]

- Les aciers inoxydables austénitiques.
- Les aciers inoxydables martensitiques.
- Les aciers inoxydables ferritiques.
- Les aciers inoxydables austéno-ferritiques.

1.2.1 Les aciers inoxydables austénitiques :

À température ambiante, les aciers inoxydables austénitiques conservent une structure austénitique cubique à faces centrées. Ces aciers sont composés de solutions solides de fer, généralement avec.

Dans le domaine de l'hypertrempe, des grains fins sont obtenus. Le nickel, avec le chrome, en constitue le principal constituant.

Le caractère de phase gamma d'éléments d'alliage importants est principalement responsable de la stabilisation de la structure austénitique à température ambiante. Pour capturer efficacement le carbone et l'azote, des éléments comme le titane et le niobium sont généralement incorporés comme stabilisants.[6]

1.2.2 Les aciers inoxydables Martensitique :

Ces aciers contiennent généralement 12 à 19 % de chrome et de carbone.

0,08 à 1,2 %, peut contenir du nickel, du molybdène et certains éléments

Additifs tels que le cuivre, le titane et le vanadium. Dans la plupart des cas, l'article sera livré tel quel.

Puisqu'il a été recuit, il est recommandé de l'utiliser de la même manière que l'acier allié.

La structure mécanique de l'état revenu représente le meilleur compromis entre eux.

Propriétés mécaniques et résistance à la corrosion. ils sont intéressants dans une certaines applications à haute température où la température de fonctionnement ne dépasse pas 650°C.[7]

1.2.3 Les aciers inoxydables ferritiques :

Les aciers ferritiques contiennent généralement une faible part de nickel et une faible part de carbone inférieure à 0,12% et 12 à 18 % de chrome. Bien que présentant la même structure que l'acier au carbone, les ferritiques ne sont pas aptes à la trempe en raison de leur faible teneur en carbone.

Les aciers inoxydables ferritiques sont relativement doux et ont une résistance mécanique inférieure à celle de l'acier inoxydable austénitique. Ils peuvent être transformés à froid, mais pas aussi bien que l'acier inoxydable austénitique.[8]

1.2.4 Les aciers inoxydables austéno-ferritique

Les aciers austéno-ferritiques ou Duplex ont des propriétés mécaniques et fonctionnelles très intéressantes en ce qui concerne la corrosion. Cependant, des mesures particulières doivent être prises lors de la fabrication, du moulage et du traitement thermique de ces aciers

Les aciers duplex ont une teneur en azote de 0,1 à 0,3 %, entre 20 et 30 % de chrome et entre 2 et 10 % de nickel. Ils peuvent également contenir environ 4,5 % de tungstène, de cuivre et de molybdène.[9]

1.3 Les aciers à outils :

Les aciers fortement alliés contenant de grandes quantités d'alliages tels que le chrome, le nickel, le vanadium, le tungstène ou le molybdène sont appelés aciers à outils. Ces éléments d'alliage augmentent la résistance à l'usure, la résistance et la ténacité. Ou pour augmenter la dureté de l'acier ou pour lui donner des propriétés particulières telles que la résistance à la corrosion et à la chaleur, la conservation de la dureté à haute et basse température. [10]

Ils sont caractérisés par :

- Une dureté élevée (60 à 65) HRC.
- Une grande résistance à l'usure.

- Une forte résistance mécanique.

On distingue actuellement quatre classes d'aciers à outils à froid :

- Les aciers au carbone pour travail à froid.
- Les aciers alliés pour travail à froid.
- Les aciers pour travail à chaud.
- Les aciers à coupe rapide.

1.4 Les aciers au carbone pour travail à froid :

Les aciers au carbone doivent fournir une dureté élevée de l'arête tranchante des outils (60 à 65) HRC après trempe et revenu à basses températures, bien supérieure à celle du matériel usiné avec une excellente résistance à l'usure pour préserver l'état de l'arête tranchante. Il est suggéré d'utiliser des aciers hypo-eutectoïde et eutectoïde traités thermiquement pour obtenir une structure dans le cas où les outils subissent des charges dynamiques. Les outils de coupe comme les fraises, les forets, les scies et les grattoirs sont fabriqués à partir d'aciers hypereutectoïdes (1,0-1,3% de C) traités et ayant une structure constituée de martensite et de carbures.

Les avantages des aciers au carbone comprennent un prix modéré, une faible dureté et un bon usinage à l'état recuit et une excellente résistance à la déformation à l'état recuit. [11]

La température de trempe des aciers au carbone doit être de 780 à 810°C, c'est-à-dire 50 à 70°C supérieure à A_{c1} mais inférieure à A_{cm} , afin de créer une structure martensitique sans compromettre la finesse du grain et sans dissoudre les carbures de la cémentite secondaire, parmi ses inconvénients : la faible pénétration de trempe. Cependant, les aciers au carbone ne peuvent être utilisés que pour la coupe à de faibles vitesses car leur forte dureté diminue considérablement à des températures supérieures à 190 ou 200°C. [12]

1.5 Les aciers alliés pour travail à froid :

Ce sont des aciers à froid pour les outils. Les aciers à outils alliés pour travail à froid et les aciers à outils au carbone ne sont pas très résistants, donc ils sont utilisés pour couper des matériaux relativement doux et à de faibles vitesses. Les températures de service ne doivent pas dépasser 235°C.

Pour réduire les déformations, le traitement thermique implique une trempe à l'huile et un revenu à 200°C.[4]

Il existe plusieurs types d'aciers utilisés pour le travail à froid :

- Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium.
- Aciers au chrome.
- Aciers au chrome-molybdène.
- Aciers au chrome-tungstène.
- Aciers au nickel-chrome.

1.5.1 Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium :

Les teneurs moyennes sont de 0,8 % C, 2,1% Mn et 0,25% V. Les aciers de cette classe sont connus sous le nom d'aciers indéformables. Ils ont une bonne indéformabilité au traitement thermique due à une température de basse trempe. Ils sont trempés étagés soit à l'huile, soit au bain de sels.

Ils offrent une solution pratique pour les outils de précision et de mesure qui ne nécessitent pas une résistance à l'usure particulière, comme les poinçons, les matrices de découpage, les calibres vérificateurs et les instruments de mesure [4].

1.5.2 Aciers au chrome :

Les additions suivantes sont incluses dans la composition moyenne : (1 à 2)% C, (0,2 à 1,3)% Cr et (0 à 0,25)% V. Les aciers à faible teneur en chrome sont utilisés pour de petits outils à fabriquer en grande série (mèches, tarauds) et pour des outils à faible trempabilité. Les pièces qui nécessitent une excellente résistance au choc ou à la flexion (extracteurs, butées).

Les nuances, qui contiennent du vanadium et ont une plus grande teneur en chrome de 13 % et contiennent du vanadium, sont très indéformables et très résistantes à la flexion et sont utilisées dans diverses fabrications, telles que les filières, les mandrins d'étirage, les galets de formage, les matrices d'extension à froid, les molettes de coupes, les fraises et les outils à bois [4]

1.5.3 Aciers au chrome-molybdène :

Ces aciers ont en moyenne une composition de (1 à 1,5) % C, (5 à 12) % Cr, (0,9 à 1,1) % Mo et (0,1 à 0,4) % V. Les aciers de ce type sont utilisés dans les mêmes catégories d'outils que précédemment car ils se déforment très peu à la trempe [4].

1.5.4 Aciers au chrome-tungstène :

Les teneurs suivantes sont généralement présentes dans ces aciers : 0,4 à 1,1 % C, 0,9 % Mn, (0,85 à 1,1) % Cr et (1 à 2) % W. Ces aciers sont généralement utilisés car ils sont durs, tenaces et ont un fort pouvoir trempant. Leurs applications comprennent une grande variété d'outils coupants, tels que des forets mèches, cisailles, ainsi que d'autres outils tels que des alésoirs, des tarauds, des filières, des poinçons et des matrices [4].

1.5.5 Aciers au nickel-chrome :

Ce type d'acier contient 0,35% de C, 1,7% de Cr et 3,75% de Ni. C'est une nuance spéciale qui est utilisée pour l'estampage à froid et qui présente des gravures de grande finesse et de coût élevé [4].

1.6 Les aciers pour travail à chaud :

Ce sont des aciers à chaud pour les outils. Il existe deux classes principales d'aciers dans cette catégorie :

- Les aciers au Cr-W-Mo-V.
- Les aciers au Ni-Cr-M

Tableau 1: Quelques nuances d'aciers à outils pour travail à chaud sont mentionnées.

N°d'ordre	%C	%Cr	%W	%Mo	%V	%Ni
1	0,6	0,9	1,85	0,2	0,15	/
2	0,4	5	1,3	1,4	0,4	/
3	0,3	2,5	9	0,3	0,4	/
4	0,55	0,85	/	0,45	/	1,75
5	0,4	1,5	/	0,5	/	4,3

La nuance Cr-W, identifiée sous le numéro 1 dans le tableau 1. 5 précédent, présente une forte résistance à l'état traité, une limite de fatigue élevée, en particulier lors de chocs répétés, et

une stabilité au revenu élevée jusqu'à 500°C. Il est utilisé comme outillage pour travailler aux chocs qui se produisent à des températures moyennes comprennent des poinçons de perçage, Des lames de cisailles à chaud et des petites matrices variées.

La deuxième nuance, qui contient 5% Cr, est un acier indéformable qui peut être utilisé dans l'outillage travaillant à chaud. Il est destiné aux tâches nécessitant une haute résistance à la compression et une excellente résistance aux chocs thermiques entre 300 et 600°C.

La troisième nuance, qui a une forte teneur en tungstène de 9 %, se distingue par une grande dureté et une excellente résistance à l'usure. Cet acier peut être utilisé jusqu'à 650°C.

Les deux nuances supplémentaires de nickel-chrome-molybdène ont une excellente pénétration de trempe et sont utilisées dans les grosses matrices d'estampage à chaud [4]

1.7 Les aciers à coupe rapide :

Les aciers rapides, également appelés aciers rapides, se distinguent par leur excellente résistance au chauffage.

Une forte résistance à la pénétration.

Une grande résistance mécanique et résistance à l'usure.

La capacité de maintenir la structure martensitique à 600°C.

Les aciers de coupe augmentent considérablement la vitesse de coupe de 2 à 4 fois et la tenue de l'outil de 10 à 30 fois par rapport aux aciers à outils ordinaires. Le tungstène est l'alliage principal. Les qualités de coupe de ces aciers augmentent avec la teneur en tungstène, qui peut atteindre environ 23 %. Il semble que le tungstène n'ait aucun effet au-delà de cette teneur.

Les teneurs en chrome sont généralement de 4 à 4,5 %. En présence de vanadium et de cobalt, le molybdène peut remplacer le tungstène et la tenue à chaud de ces aciers s'améliore.

Les carbures lédeburitiques sont présents dans les aciers rapides. Ils sont constitués de ferrite alliée et de carbures de type M₆C, M₂₃C₆, MC et M₃C à l'état recuit, avec le M₆C comme acier principal dans les aciers rapides et la ferrite étant principalement dissoute en chrome.

Les outils rapides sont soumis à une trempe de 1200 à 1300°C pour assurer une bonne tenue à chaud.

Dissolution des carbures secondaires et obtention d'austénite hautement alliée au Cr, W, Mo et V au chauffage. Après trempe, cela garantit une structure martensitique stable, ce qui

garantit une excellente tenue à chaud. Après la trempe, un revenu multiple à haute température se produit. [14]

Conclusion :

Enfin, ce chapitre fournit un aperçu général des aciers, de leurs différentes classes et familles et de leurs domaines d'application dans l'industrie moderne.

Chapitre 2 : Traitement thermochimique

Introduction :

Le traitement thermochimique implique un traitement thermique effectué dans un milieu approprié afin que la composition chimique du métal de base soit modifiée en échange de ce milieu. Dans ce cas précis, les traitements ajoutent des composants à la couche superficielle du métal à l'aide de milieux solides (cémentes), liquides (bains de sels) ou gazeux. La diffusion peut être suivie ou non d'un traitement thermique de durcissement par trempe qui transforme l'austénite de la couche enrichie en martensite, selon la nature des éléments apportés. En cas de traitement thermochimique d'un acier, la couche enrichie peut être transformée en martensite.

Il existe de nombreux traitements thermochimiques destinés à augmenter la résistance des pièces à la fatigue, à l'usure, au frottement, au grippage et à la corrosion, mais nous ne parlerons que brièvement des principes et des effets métallurgiques de ces traitements particulièrement importants, tels que la cémentation par le carbone, la nitruration, la carbonituration, la boruration et la Bor-nitruration.

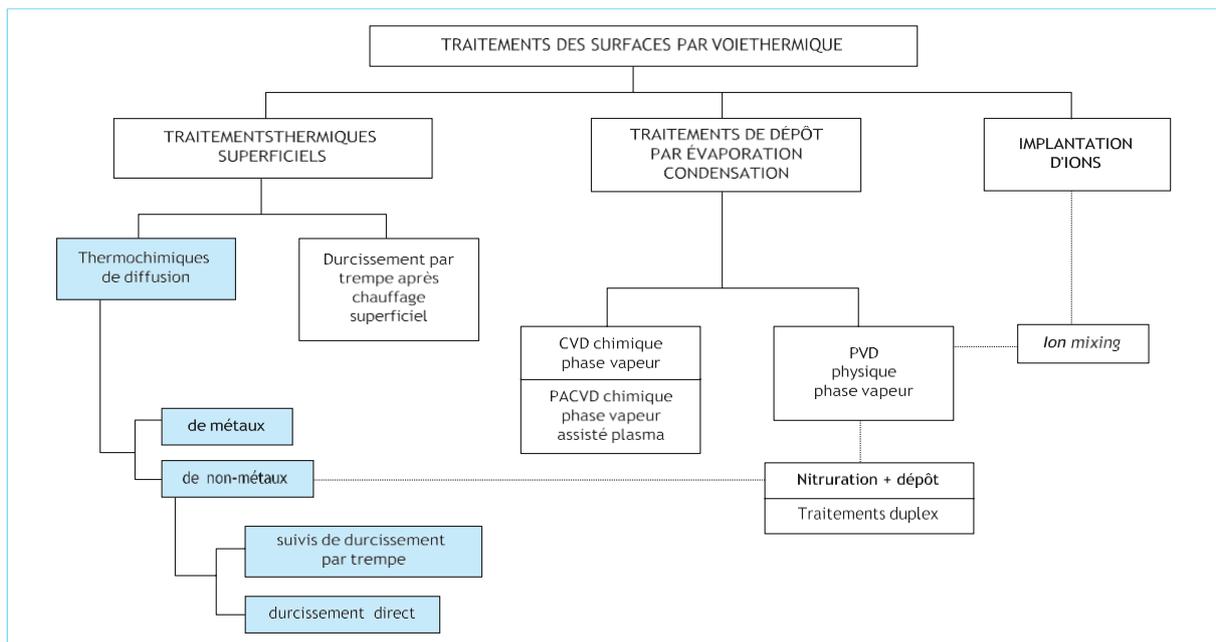


Figure 1: Traitements des surfaces par voie thermique

1 Définition:

Selon la norme NF A 02-010, un traitement thermochimique est effectué dans un milieu approprié pour modifier la composition chimique à la surface du métal de base en interagissant avec ce milieu. [15]

Le but de ces traitements est obtenir de nouvelles propriétés (Dureté plus élevée, augmentation à la résistance à la fatigue, amélioration de la résistance à la corrosion et au grippage.), la couche superficielle du métal peut être recouverte par des éléments provenant d'un milieu qui peut être solide (ciments), liquide (bain de sels), gazeux ou même plasma.[16]

Les éléments qui diffusent à travers la surface sont soit :

- 1) **Du metalloïde (Carbure, Nitrure, Borures**)
- 2) **Des métaux (L`aluminium Al, le niobium Nb, le titane Ti&..)**

Tableau 2: élément diffusants et traitements thermochimiques

Tableau1–élément diffusants et traitements thermochimiques		
Elément (s)diffusant(s)	Traitement	Principaux mécanismes résultants
Carbone	Cémentation (carburation) +durcissement par trempé	Durcissement martensitique par trempé
Azote	Nitruration ferritique	Durcissement par: - précipitation; - solution solide et combinaison chimique (couche de combinaison).
Carbone+azote	Carbonitruration+durcissement par trempé	Durcissement martensitique par trempé de la zone enrichie en carbone et azote
Azote+carbone	Nitrocarburation ferritique	Durcissement par: - précipitation; - solution solide et combinaison chimique (couche de combinaison).
Azote+carbone	Nitrocarburation austénitique	Durcissement martensitique(martensite a l'azote)par: - trempé; - solution solide et combinaison chimique.
Soufre+azote+carbone	Sulfonitrocarburation	Durcissement par: - précipitation; - solution solide et combinaison chimique.
Azote+carbone+oxygène	Oxynitrocarburation	Durcissement par: - précipitation; - solution solide et combinaison chimique.
Bore	Boruration	Combinaison chimique(Ferro-borure)
Chrome	Chromisation	Alliage et combinaison chimique (carbure de chrome ,cas des aciers au carbone)
Aluminium	Aluminisation	Alliage
Chrome+aluminium	Chrome-aluminisation	Alliage
Zinc	Sherardisation	Alliage
Silicium	Siliciuration	Alliage
Manganèse	Manganisation	Alliage

2 La cémentation :

Le plus ancien traitement thermochimique maîtrisé par l'homme pour augmenter la dureté superficielle des pièces en acier est la cémentation. En conséquence, la quantité de carbone présente sur la surface est augmentée. La trempe à l'huile est toujours suivie de la diffusion pour créer des structures dures de martensite dans la couche enrichie. [17]

2.1 Les différents types de Cémentation:

La cémentation gazeuse, solide et liquide sont les trois méthodes de cémentation.

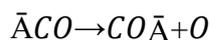
2.1.1 Cémentation solide:

L'agent de saturation utilisé dans cette tâche est un ciment solide, généralement du charbon de bois. Des activateurs comme le carbonate de baryum $BaCO_3$ et le carbonate de sodium Na_2CO_3 sont ajoutés à 10 à 40 % du poids du charbon pour accélérer la cémentation. Le ciment solide le plus fréquemment utilisé est le charbon de bois, qui est composé de 20 à 25 % de $BaCO_3$ et de 3,5 % de $CaCO_3$.

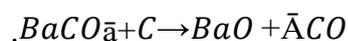
Les composants sont disposés dans des caisses soudées en acier, ou parfois en fonte. Le point de cémentation est entre 900 et 940°C.

Les caisses ne peuvent être ouvertes qu'après avoir été refroidies à l'air jusqu'à 400 ou 500°C après avoir été cimentées.[18]

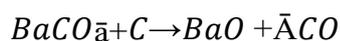
La méthode suivante est utilisée pour obtenir du carbone atomique :



L'ajout de carbonate rend le ciment beaucoup plus actif et enrichit l'oxyde de carbone dans l'atmosphère :



L'ajout de carbonate améliore l'activité du ciment et enrichit l'atmosphère en oxyde de carbone :



2.1.2 Cémentation gazeuse:

La pièce à cimenter est chauffée dans un milieu de gaz contenant du

carbone lors de ce processus. Il existe de nombreux avantages à utiliser cette technique par rapport à la cémentation par agent solide, notamment la possibilité d'obtenir une concentration précise du carbone dans la couche à cémenter, la réduction de la durée du processus en évitant le chauffage préalable des caisses remplies de ciment, etc. Le gaz naturel CH₄ et les mélanges de propane et de butane soumis à un traitement spécial produisent la couche cémentée la plus efficace. [19]

La dissociation du méthane et de l'oxyde de carbone est la principale réaction qui permet la carburation :



Les fours à moufle et sans moufle, à marche continue et à marche discontinue sont les plus courants pour effectuer la cémentation gazeuse. Le processus de cémentation se produit à une température de 930 à 650°C et dure 6 à 12 heures dans les fours à moufle ou à marche continue pour obtenir une couche de 0,7 à 1,5 mm d'épaisseur. Il est possible d'accélérer l'opération en faisant circuler les gaz ou en augmentant la température de cémentation jusqu'à 1000 à 1050°C, à condition que les aciers utilisés soient à grains fins par hérédité. Les techniques de déformation du plastique à froid accélèrent également la cémentation [19].

2.1.3 Cémentation par des agents liquides:

Les sels fondus contenant du Na₂CO₃ sont utilisés pour la cémentation liquide. Le processus est plus rapide que les autres approches et peut être terminé rapidement à 850°C. Le cyanure de sodium est à 45 %, le chlorure de sodium à 18 % et le carbonate de sodium à 37 % dans le mélange de sels fondus. Parfois, un mélange de carbure de silicium est utilisé.

Les deux sels restants modèrent la pénétration de carbone dans l'acier. Ils réduisent l'évaporation du cyanure qui fond à 560°C, mais le bain s'appauvrit par oxydation en contact avec l'air. Le cyanogène est l'agent actif.

De plus, ces bains diffusent de l'azote dans le métal. La cémentation par agent liquide permet des profondeurs de cémentation similaires pour des temps plus courts que la cémentation par agent solide et gazeux [19].

3 La carbonitruration :

Le durcissement superficiel des morceaux d'acier chauffés dans l'atmosphère (CO + N₂ + C₃H₈) est appelé carbonitruration. Ce processus permet au métal d'absorber simultanément du carbone et de l'azote. Ainsi, ce processus combine la cémentation et la nitruration. La principale cause du durcissement est la cémentation par carburation de la couche superficielle des composants. L'azote joue principalement un rôle dans l'abaissement du point de transformation Ac₃. Par conséquent, la température de chauffage lors de la trempe est inférieure (700 à 850 °C).[20]

3.1 La carbonitruration en phase gazeuse :

Les composants sont placés dans une atmosphère qui peut produire du carbone et de l'azote.

3.2 La carbonitruration en phase solide :

La carbonitruration en phase solide des aciers est un traitement thermo-chimique qui consiste à enrichir la surface de l'acier en carbone et en azote. Ce processus se déroule généralement entre 820°C et 900°C dans une atmosphère contenant des gaz tels que le monoxyde de carbone (CO), l'hydrogène (H₂) et l'ammoniac (NH₃). L'objectif est d'améliorer les propriétés mécaniques de la surface, telles que la dureté et la résistance à l'usure, tout en conservant une bonne ductilité à cœur. [21]

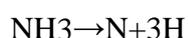
4 La nitruration :

Selon la norme française NFA 02-010, la nitruration est un traitement thermo-chimique auquel un produit ferreux est soumis pour obtenir un enrichissement superficiel en azote.

La nitruration consiste en la diffusion de l'azote pour durcir la surface, généralement sans traitement thermique ultérieur.

4.1 Techniques de nitruration :

Dans ce processus, l'azote est produit par la décomposition du gaz d'ammoniac qui constitue l'atmosphère nitrurante selon la réaction suivante :



La température typique de nitruration est de 500°C à 550°C, inférieure à la température de transformation eutectoïde des binaires de fer-N, qui est d'environ 590°C.

Une partie de l'azote produit est diffusée à la surface de l'acier, tandis qu'une autre partie est désorbée pour reconduire à la formation de la molécule N₂. La diffusion de l'azote dépend de la concentration d'azote atomique à proximité. La nitruration sous forme gazeuse

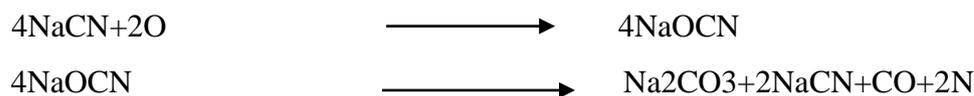
se produit généralement dans un four à cloche doté d'un système de convection forcée de l'atmosphère. [22]

4.2 La nitruration liquide :

Ce type de nitruration utilise des bains de sels fondus (cyanure alcalin) à 570°C, qui sont applicables aux aciers alliés et aux aciers de nitruration alliés.

La formation de cyanates par oxydation des cyanures entraîne l'apport d'azote.

Comme le montre la réaction chimique suivante :



4.3 Nitruration ionique :

Dans une atmosphère raréfiée contenant un mélange gazeux (N₂ + NH₃) à faible pression, la nitruration ionique est obtenue à partir d'une décharge lumineuse, c'est-à-dire que l'azote est introduit à partir d'ions d'un plasma obtenu par décharge électrique sous tension de 1100 à 1400 V.

5 Boruration :

Lors du traitement thermochimique de la surface appelé boruration, des atomes de bore sont introduits à la surface des pièces traitées. Le bore introduit à la surface réagit avec le matériau de base pour former des borures avec des propriétés mécaniques exceptionnelles.

Le traitement de la boruration peut être utilisé avec une variété de matériaux (ferreux, non ferreux et matériaux) pour produire des couches de borures extrêmement solides.

Une réaction chimique ou électrochimique entre un milieu très riche en bore et la surface du matériau à borurer peut entraîner la diffusion du bore à travers la surface des matériaux traités.

La source de bore peut être un milieu gazeux, liquide ou solide.

Plusieurs travaux de recherche ont examiné ces différentes méthodes de boruration, et

chacune d'entre elles présente des avantages et des inconvénients. Les aciers sont l'un des matériaux les plus couramment utilisés pour le traitement de la plomberie, car ils peuvent être un matériau de base bon marché avec de bonnes propriétés de surface à un prix raisonnable.[23]

5.1 La boruration en milieu gazeux :

En milieu gazeux, la boruration s'effectue par la décomposition ou la dissociation thermique des composés. Les composés les plus courants dans ce processus sont le diborane (B_2H_6), les halogénures de bore (BF_3 , BCl_3 , BBr_3 , etc.) et les composés organiques de bore ($(CH_3)_3B$, $(C_2H_5)_3B$, etc.).

Les composés utilisés dans ce procédé sont les suivants:

5.1.1 Le diborane (B_2H_6) :

La combinaison de diborane et d'hydrogène ($B_2H_6-H_2$) permet de produire des couches de borure de qualité adéquate. La toxicité et l'inflammabilité du diborane empêchent son utilisation dans l'industrie.

5.1.2 Composés organiques à base du bore :

Le triméthyl de bore ($(CH_3)_3B$) et le triéthyl de bore ($(C_2H_5)_3B$) sont les composés les plus couramment utilisés. Les composés riches en carbone cémentent fréquemment les aciers traités, ce qui réduit la qualité des couches borurées.

5.1.3 Les halogénures du bore (BF_3 , BCl_3 ou BBr_3) :

Les surfaces des composants traités sont fortement corrodées lorsque les halogénures du bore sont utilisés. Cela entraîne des couches borurées plus poreuses et moins compactes.[22]

En raison de certains problèmes, les composés gazeux de bore n'ont pas connu un grand succès à l'échelle industrielle :

- Le composé diborane est poisseux et inflammable.
- Les halogénures de bore corrodent considérablement l'acier traité, ce qui entraîne des couches de bore non compactes.
- La carburation des aciers traités est due à la teneur élevée en carbone des composés organiques de bore, ce qui réduit la qualité des couches de bore obtenues.

5.2 La boruration en milieu liquide :

La libération de bore vers la surface d'une pièce traitée nécessite la réduction chimique du composé porteur de bore dans un milieu liquide. Sous une tension appliquée, cette réduction peut être effectuée soit par voie électrochimique, soit par voie chimique, en ajoutant un agent

réducteur au milieu de boruration.

Plusieurs chercheurs ont décrit les sels utilisés dans les traitements de boruration avec ou sans électrolyse et conduisent généralement à des couches bourrées très épaisses de haute qualité. Cependant, il est important de noter que ces bains ont des difficultés à nettoyer la pièce traitée après avoir été borurée. [24]

5.3 La boruration en milieu solide :

5.3.1 Technique des pâtes :

Ces méthodes sont principalement utilisées pour la boruration partielle et la boruration de grosses pièces qui sont difficiles à traiter par la technique des poudres. Les composants à bourrer sont recouverts de pâte à bourrer, puis ils sont chauffés à l'aide d'une méthode d'induction, d'un effet Joule ou encore d'un four traditionnel.

Dans le cas d'une boruration partielle, les zones à ne pas bourrer sont protégées par des dépôts électrolytiques de cuivre ou d'autres produits qui empêchent la diffusion du bore et ralentiront la corrosion à haute température.

Les deux composants des pâtes de boruration sont :

1. Un constituant solide contenant une source riche en bore (par exemple, du carbure de bore, du fer de bore ou du bore amorphe), un activateur (par exemple, de la cryolite ou du fluor de bore) et un diluant inerte (par exemple, de l'alumine ou du carbure de silicium).
2. Un liant liquide de nature organique (méthyle, cellulose ou nitrocellulose dissous dans l'acétate de butyle) [25]

5.3.2 Technique des poudres :

En raison de sa simplicité et de la propreté des pièces qu'elle produit, la boruration en poudre est actuellement la technique la plus utilisée dans la plupart des pays industrialisés. Cette méthode consiste à emballer les pièces à traiter dans des fours à moufles. Les poudres de boruration ont généralement une mauvaise conductibilité thermique des temps relativement importants lorsqu'il s'agit d'homogénéiser la température [26].

Les mélanges de poudre des compositions chimiques suivantes sont les plus couramment utilisés dans les entreprises [22] :

Tableau 3:Composition chimique des mélanges des poudres utilisés

Type	B4C%	SiC%	KBF4%	Na2CO3M%	Na2B4O7 %
1	5	90	5	/	/
2	50	45	5	/	/
3	85	/	/	15	/
4	95	/	/	/	5
5	84	/	/	/	16

Tableau 3:Composition chimique des mélanges des poudres utilisés [26]

5.4 Avantages de traitement de boruration :

Le traitement de boruration présente plusieurs bénéfices spécifiques par rapport aux autres méthodes de traitement thermo-chimique. Les pièces borurées présentent deux avantages majeurs : leur résistance à la corrosion et leur grande dureté.

5.5 Résistance à la corrosion des aciers exposés à la boruration :

La boruration permet une amélioration significative de la résistance des matériaux ferreux à la corrosion et à l'érosion dans les acides dilués et les milieux alcalins non oxydants. [27]

Il est important de souligner que les aciers traités par la nitruration ou la cémentation ont une résistance à la corrosion plus élevée que les aciers borurés. [28]

Diverses études ont examiné la résistance des aciers borurés à la corrosion. Le comportement de la corrosion de l'acier faiblement allié a été évalué lorsqu'il a été soumis à l'électrolyse du sel fondu.

Pendant 48 heures, il est recommandé de se immerger prolongement dans des solutions contenant 10% de HCl, H3PO4, H2SO4, HNO3 et HClO4 à température ambiante. La vitesse de corrosion estimée en fonction de la perte de poids des échantillons est réduite par les couches de FeB / Fe2B présentes à la surface de l'acier faiblement allié.[29]

Les aciers exposés au processus de boruration ont une résistance à la corrosion bien supérieure à celle des aciers non protégés.

6 La dureté :

Différentes recherches ont examiné et confronté les conséquences de la nitruration, de la carburation et de la boruration sur les matériaux en acier. Les conclusions obtenues pour les

aciers borurés révèlent une augmentation significative de la dureté superficielle par rapport aux résultats de la la cémentation et la nitrification. Par exemple, l'acier 1010 a été exposé aux procédés de nitruration, de carburation et de boruration avec une durée d'exposition de 6 heures, avec des valeurs de dureté Vickers (HV) d'environ 360, 780 et 1420 HV.[29]

La combinaison d'un fort coefficient de frottement superficiel et d'une dureté de surface élevée de la couche borurée joue également un rôle important dans la lutte contre les principaux mécanismes d'usure : adhérence, oxydation tribale, abrasion et fatigue superficielle. [30]

Conclusion :

La boruration et la nitruration, deux processus thermochimiques de durcissement superficiel, modifient la surface d'un matériau en diffusant des atomes de bore et de nitrure dans la couche superficielle du substrat à des températures allant de 800°C à 1000°C. En conséquence directe, les alliages ferreux ont une dureté et une résistance à l'usure améliorées.

En résumé, les traitements thermochimiques par voie solide, également appelés traitements par poudres, sont les plus avantageux car ils sont faciles à utiliser.

CHAPITRE 03 : Partie Expérimentale

Introduction :

Ce chapitre présente spécifiquement les différentes technologies utilisées dans une étude comparative des traitements thermochimiques de boruration en poudre sur un acier à outil BÖHLER-K100 et BÖHLER-K110.

Nous présentons d'abord l'acier à outil pour travail à froid BÖHLER-K110 utilisé pour le traitement de boruration, puis décrivons les méthodes et les conditions opératoires qui permettent d'obtenir un durcissement superficiel donnant la formation d'une couche. La caractérisation de la couche borure est réalisée par des méthodes expérimentales adaptées. La morphologie de la couche borure a été examinée avec un microscope optique D'ECLIPSE LV150N, la durée a été mesurée avec un test de micro dureté Vickers de type FALCON 400, suivi d'un test tribologique.

1 Matériau étudié :

Le BÖHLER K100 (X210Cr12), plus connu sous le nom de Z200 Cet acier à outils couramment utilisé est hautement résistant à l'usure abrasive. Comparé aux aciers à outils modernes pour le travail à froid, il présente l'avantage d'un traitement thermique simple avec des températures de trempe plus basses et une seule étape de revenu.

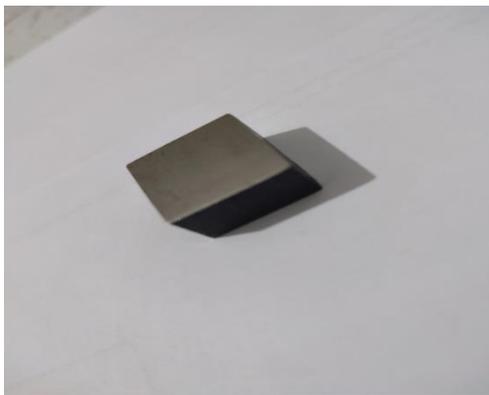


Figure 2: BÖHLER-K100

Le K110 (AFNOR : Z160CDV12), plus connu sous le nom de D2, développé par la société autrichienne BÖHLER Steel Company, est un acier à outil pour le travail à froid semi inoxydable à haute teneur en carbone et en chrome, en raison de sa dureté, de sa résistance à l'usure et à l'abrasion exceptionnelles.

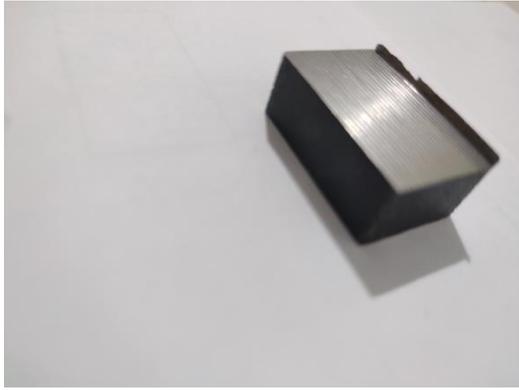


Figure 3: BÖHLER-K110

1.1 Composition chimique :

Tableau 4:Composition chimique (% masse) d'acier BÖHLER-K100 [32]

C	Si	Mn	Cr
2,00	0,25	0,35	11,50

Tableau 5: Composition chimique (% masse) d'acier BÖHLER-K110 [32]

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1.55	0.30	0.30	11.30	0.75	0.75

2 Application industrielles

A. Les applications industrielles d'acier à outil BÖHLER-K110 :

Outils de coupe, Outils de coupe de précision, Matrices, poinçons, Mandrins pour molettes de filetage, Molettes de filetage, poinçons à emboutir, Outils de presse, outils d'usinage du bois, Lames de cisailles, outils d'emboutissage profond, Cylindres pour laminage à froid, outils de mesure, Moules pour matières plastiques.

B. Les applications industrielles d'acier à outil BÖHLER-K100 :

Il est couramment utilisé dans des applications telles que les composants pour l'industrie du recyclage, les cylindres, pièce d'usure, le découpage et l'emboutissage fins, ainsi que le formage et la frappe à froid. [31]

3 Préparation des échantillons :

Les échantillons ont été fournis par la société SFMO MOUSSAOUI PRO DISTRIBUTEUR spécialité dans la distribution des matières dont les métaux et aciers, et le concessionnaire de BÖHLER Steel Company en Algérie.

3.1 Découpage :

Le découpage des échantillons ont été fait au niveau de l'entreprise SFMO MOUSSAOUI PRO DISTRIBUTEUR Boufarik Blida en utilisant une scie mécanique de marque METAL COUPE S-300HB et on a découpé une barre de K110 (30x20) mm a des petits échantillons de (30x20x10) mm et une autre de K100 (20 x20) mm on petits échantillons de (20x20x10) mm.



Figure 4: Scie mécanique utilisée SFMO MOUSSAOUI/PRO DISTRIBUTEUR

3.2 Polissage :

La préparation d'échantillons pour le traitement thermochimique nécessite un polissage dans tous les côtés car il y a plusieurs raisons :

- **élimination des défauts de surface**
- **amélioration de l'adhérence**
- **uniformité de la surface**
- **réduction des contraintes internes**
- **optimisation des propriétés mécaniques**

Les échantillons ont été polis au niveau du laboratoire de sciences des matériaux du département de génie mécanique à l'aide d'une polisseuse de marque Minitex 233, en utilisant du papier abrasif de différents grades : 60,80, 220, 280, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500,2000



Figure 5: polisseuse Minitex 233

4 Traitement thermochimique :

Un traitement thermochimique est un processus auquel un produit ferreux est soumis pour modifier sa composition chimique et physique en surface. L'objectif est d'améliorer certaines propriétés spécifiques de la couche superficielle de la pièce.

En résumé, les traitements thermochimiques visent à renforcer la surface des pièces tout en conservant une structure résiliente et ductile au cœur de l'acier. Cela permet d'obtenir une combinaison optimale de propriétés mécaniques pour des applications spécifiques.

4.1 Préparation des poudres :

La poudre utilisée pour le traitement thermochimique de boruration est composée d'un Mélange suivant :

- 20% de carbure de bore (B_4C). (**source de boruration**)
- 5% de sodium tétra-fluor borate ($NaBF_4$). (**l'activateur de la réaction**)
- 75% de carbure de silicium (SiC). (**le déliant**)

4.2 Procédé de traitements thermochimiques :

Nous avons placé les échantillons au centre de la poudre placée à l'intérieur du creuset de forme cylindrique en porcelaine.

Les échantillons sont placés dans un four électrique et exposés à température 1000°C pour K100 et 1050°C pour le K110, avec une vitesse de chauffage de 7°C/min, et un temps de maintien de 6h pour tous les échantillons.

Une fois que le traitement est terminé, le four est éteint et on laisse le creuset refroidir lentement dans le four fermé.



Figure 6: four électrique marque Nabertherm, Notre cresset est en porcelaine

5 Caractérisation microstructurale :

5.1 Polissage :

On a fait un deuxième polissage, Ce dernier comprend une série de polissage à l'aide de papier abrasif à grain de plus en plus fin {60,80,280,400,600,800,1000,1200,1500,2000} pour avoir l'état miroir.

5.2 Attaque chimique :

La méthode d'attaque chimique consiste à utiliser un réactif (Nital) pour distinguer les différentes phases de notre acier et les joints de grains. Cette méthode implique de tremper la face à attaquer dans le réactif sélectionné pendant une période prédéterminée.

Pour notre examen nous avons effectué l'attaque suivante :

- 95 ml d'éthanol (alcool éthylique).
- 5 ml d'acide nitrique.
- Durée d'attaque 10 secondes.

Après avoir obtenu un bon résultat de l'attaque chimique on passe à l'examen optique.

5.3 Observation microscopique:

- Le mode le plus fréquemment employé en microscope optique est le fond clair, ce qui permet d'étudier des préparations opaques telles que des coupes polies et des étalons.

Le microscope optique peut atteindre des grossissements de 100 fois pour un objectif de 10, un grossissement de 200 fois pour un objectif de 20 et un grossissement de 500 fois avec un objectif de 50.

Nous avons réalisé une analyse microstructurale de nos échantillons en utilisant un microscope optique Nikon Eclipse LV150N. Ce dispositif est relié à un ordinateur et offre la possibilité de capturer des images numériques et des micrographies des échantillons. Le laboratoire L.E.R.T.I du département de mécanique de l'université de Blida 1 a employé le microscope.



Figure 7: Microscope optique utilisé de type Eclipse LV150N.

6 Test tribologique Pion-Sur-Disque :

Les échantillons ont été soumis à des tests tribologiques à l'aide d'un tribomètre de type ANTON PAAR TRB3 CSM, produit en Suisse (bille-disque).

On utilise ce dispositif afin d'évaluer le coefficient de frottement et l'usure des matériaux utilisés en contact.

Il consiste à faire tourner un disque en céramique avec une bille en acier, sous une charge et une vitesse déterminées. Un capteur de force dans le tribomètre mesure la force tangentielle et normale exercée par la bille sur le disque.

Le coefficient de frottement peut être calculé en fonction de la relation entre ces deux forces. Une fois le test terminé, l'usure est évaluée en mesurant le volume de matière perdu par la bille et le disque.

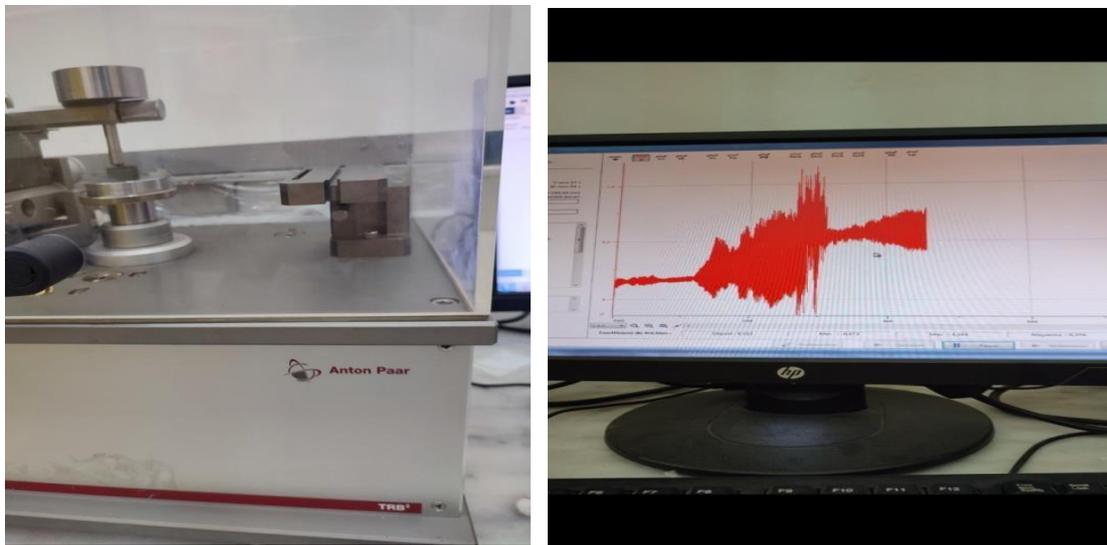


Figure 8: Le tribomètre TRB3

Les paramètres du test sont :

- La charge : 10N.
- Distance : 300m.
- Temps : 30min.
- Vitesse : 15cm/min

CHAPITRE 04 : résultats et discussion

Introduction :

Ce chapitre comprend les résultats des traitements thermochimiques de boruration par technique de poudres, réalisé sur l'acier à outil pour travail à froid BÖHLER- K100 et BÖHLER-K110, On trouvera aussi les résultats de caractérisation mécanique par micro dureté et par test tribologique de nos échantillons.

Le premier chapitre se concentre sur l'analyse microscopique et les couches qui découlent des deux traitements, ainsi que sur la nature des phases qui les constituent.

Les résultats tribologiques et de micro dureté sont présentés dans la deuxième partie, où les données des échantillons de boruration K100 et K110 sont comparées

1 Observation microscope optique :

1.1 La microstructure :

L'examen au MO (microscope optique) des échantillons des aciers a outil BÖHLER-K110, et BÖHLER-K100 après l'attaque chimique.

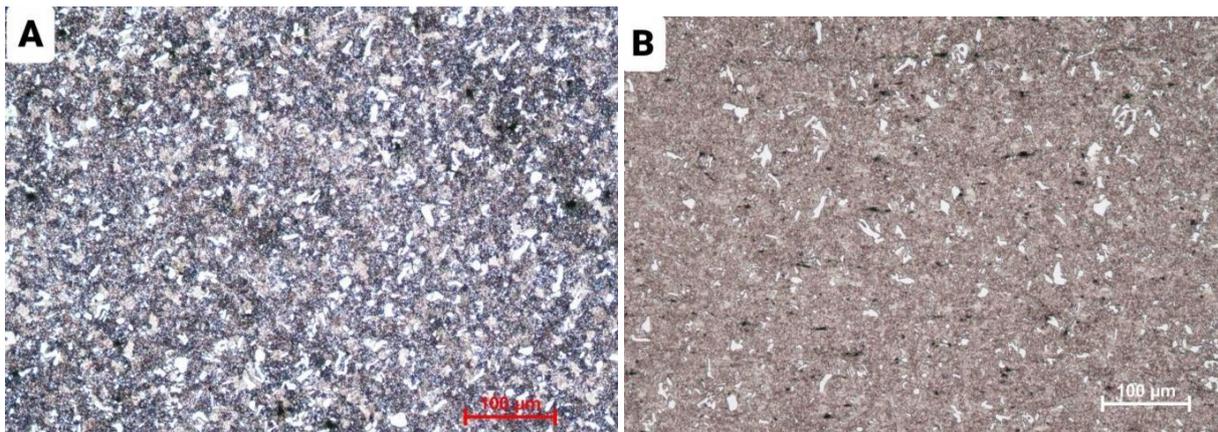


Figure 9: la microstructure de BÖHLER non traité a l'échelle X100

Avec :

A : K100, B : K110

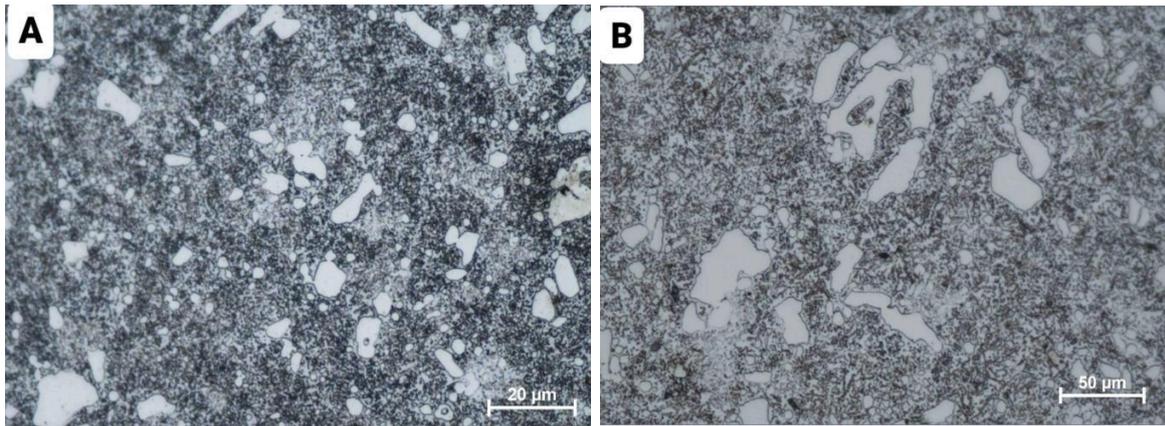


Figure 10: la microstructure de BÖHLER non traité a l'échelle X500

Avec :

A : K100, B : K110

On observe les phases microstructurales BÖHLER K100 :

Martensite (M) : Formée lors du refroidissement rapide après la trempe (la phase la plus foncée)

Perlite (P) : Structure lamellaire formée lors du revenu.(la phase de la couleur claire)

Carbure (K) : Présent dans l'acier sous forme de carbures de chrome. (la phase de la couleur blanche).

Concernant les phases microstructurales BÖHLER K110 :

On observe que il y mois de carbures de chrome et de martensite

1.2 Discussion :

La microstructure de l'acier BÖHLER K100 et celle du BÖHLER K110 présentent des différences importantes. Voici un bref aperçu :

1. BÖHLER K100 :

- Microstructure : Martensitique (composée principalement de martensite).
- Contient une quantité plus élevée de carbures (comme le carbure de chrome) qui renforcent la matrice martensitique.

2. BÖHLER K110 :

- Microstructure : Lédéburitiques (composée de perlite et de martensite).
- Contient moins de carbures que le K100.

En résumé, le K100 a une microstructure martensitique plus dure, tandis que le K110 présente une microstructure lédéburitiques avec une meilleure ténacité.

2 Observation de la couche formée :

L'examen a été réalisé sur des échantillons des aciers à outil BÖHLER-K100, après un Traitement thermo-chimique de boruration à une température de 1000°C et BÖHLER-K110 à 1050°C

À l'aide d'un microscope optique, nous avons déterminé la couche de boruration d'après une coupe transversale.

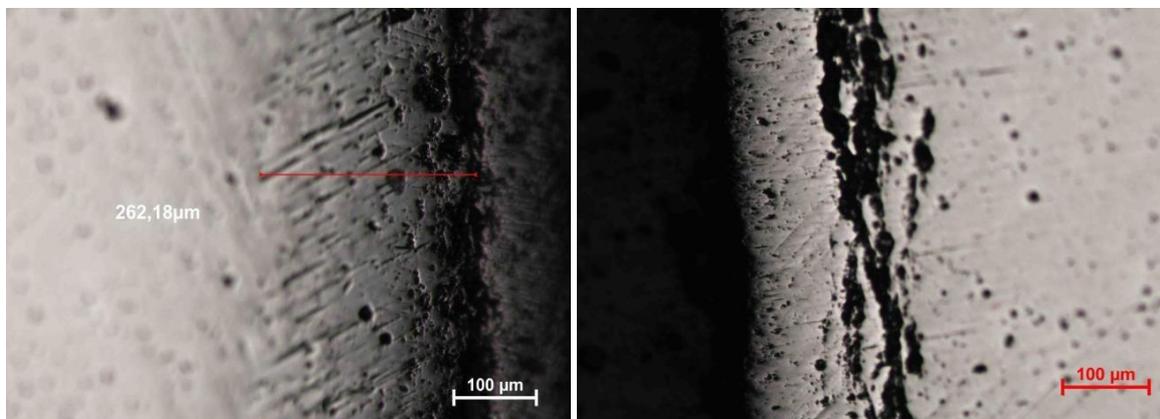


Figure 11: la couche de boruration d'acier K100 traité

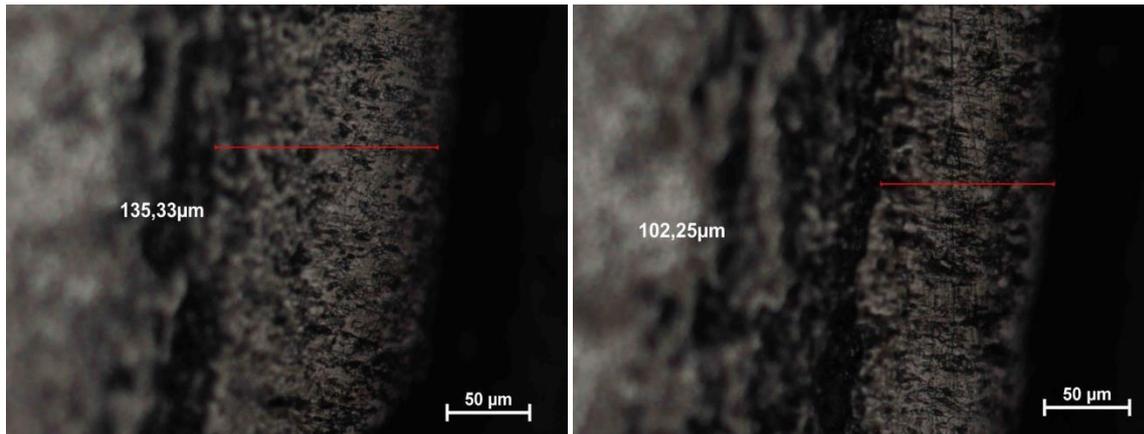


Figure 12: la couche de boruration d'acier K110 traité

2.1 Discussion :

On destine l'épaisseur de cette couche aux alentours 250 μm pour K 100 et 130 μm pour K110 et on remarque que cette dernière elle est continue et dense

Elle est probablement de FeB et FeB₂

3 Essai tribologique Pion-Sur-Disque :

L'essai tribologique pion sur disque consiste à mettre un échantillon sur un disque tournant et appliquer une force par l'aide d'une bille d'acier pendant un temps précis pour avoir le frottement.

Les paramètres opératoires :

- La charge : 10N.
- Distance : 300m.
- Temps : 30min.
- Vitesse :15 Cm /min.

3.1 Coefficient de frottement :

Le coefficient de frottement (μ) est un rapport de la force normale sur la force tangentielle

En d'autres termes, il mesure la facilité avec laquelle le mouvement se produit lorsque deux surfaces sont en contact l'une avec l'autre

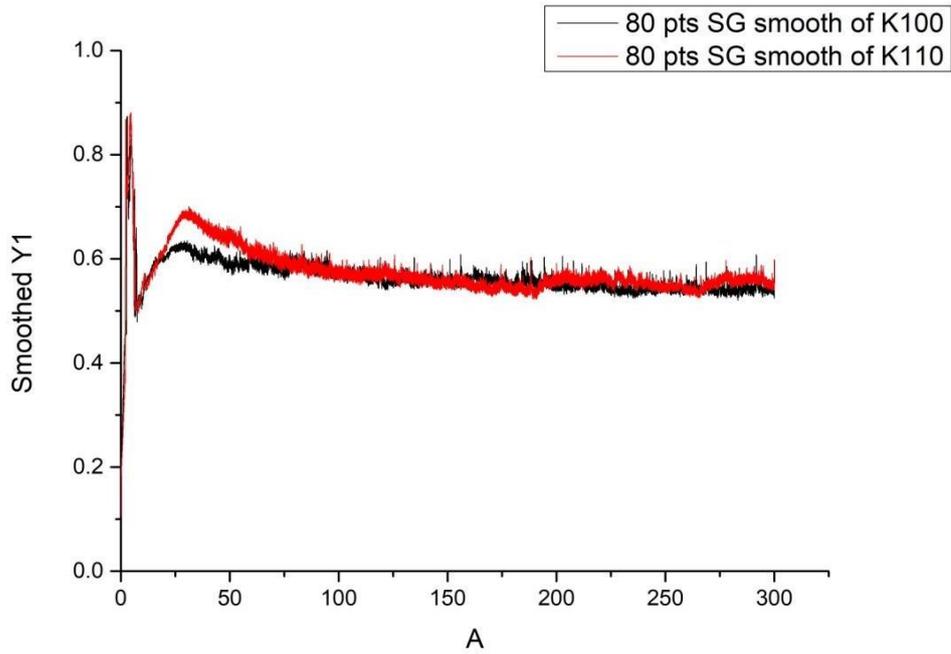


Figure 13: coefficient de frottement des échantillons non traités

Avec : A : distance (m) , Y1 : coefficient de frottement

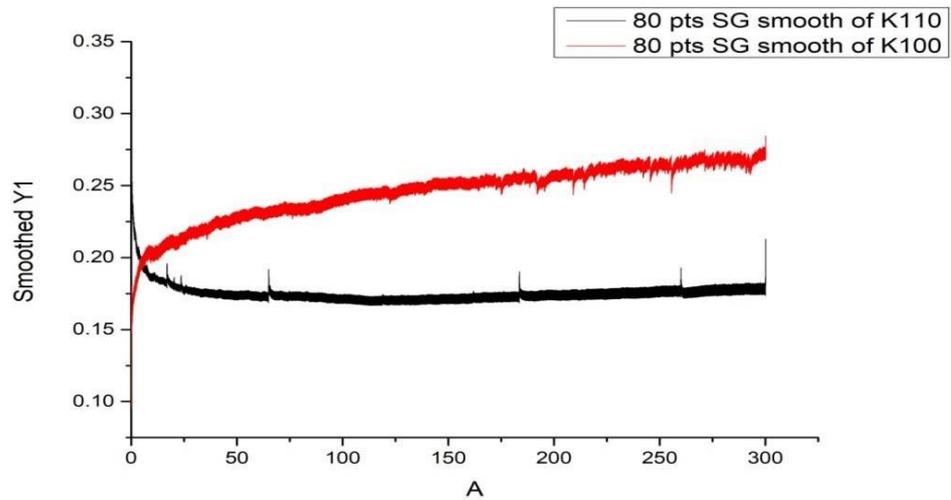


Figure 14: coefficient de frottement des échantillons traités

Avec : A : distance (m) , Y1 : coefficient de frottement

3.2 Taux d'usure :

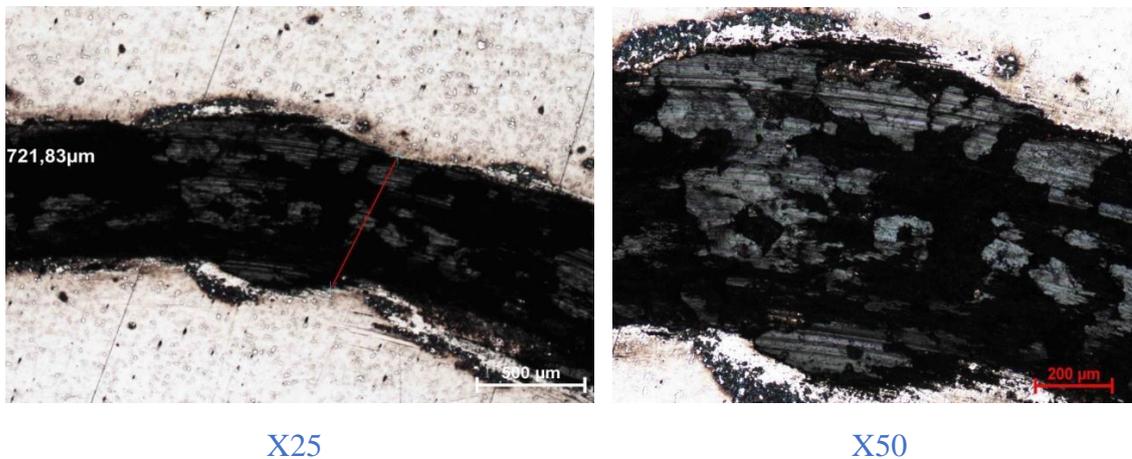
Le taux d'usure est le taux d'intérêt maximal légal que les établissements de crédit sont autorisés à appliquer lorsqu'ils accordent un prêt. Il vise à protéger les emprunteurs contre des propositions de prêts excessivement coûteuses.

Tableau 6: taux d'usure de nos échantillons

Echantillon	Taux d'usure
K100 NT	$2.81986 * 10^{(-4)}$
K110 NT	$4.55022 * 10^{(-4)}$
K100 T	$7.99053 * 10^{(-7)}$
K110 T	$1.68928 * 10^{(-7)}$

3.3 Expertise de la trace d'usure:

Figure 15: Micrographie de la trace d'usure de l'échantillon K100 non traité

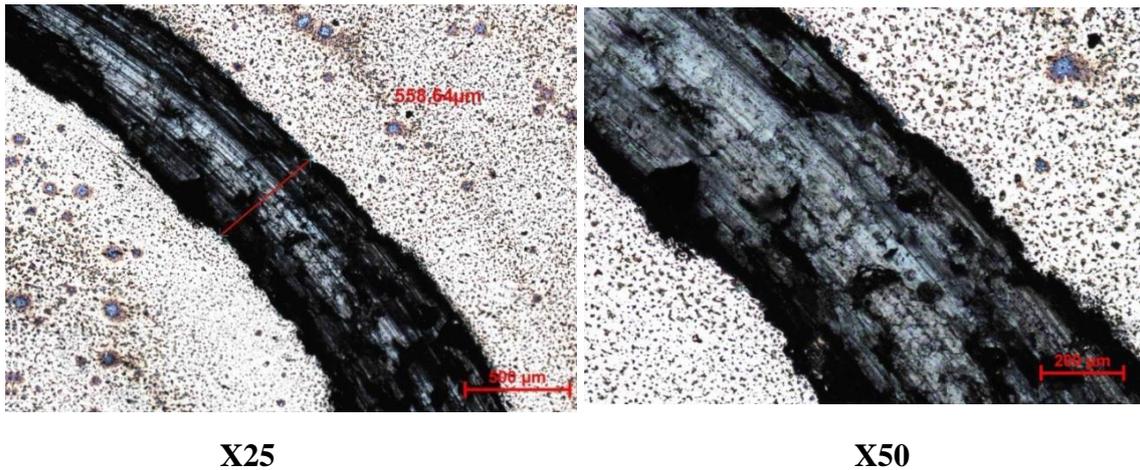


On remarque que la trace d'usure sera grosse ca veut dire que il ya un grand perte de matière dans cette zone.

D'après l'échelle X50 en remarque que :

- 1) Il ya arrachement de la matière donc il y d'usure adhésive
- 2) Il ya des rayures : usure abrasive

Figure 16: Micrographie de la trace d'usure de l'échantillon K110 non traité



D'après l'échelle X50 en remarque que :

- 1) Il ya arrachement de la matière donc il y d'usure adhésive
- 2) Il ya des rayures : usure abrasive 3 corps a cause de la zone claire.

3.4 Perte de masse :

Tableau 7: la perte de la masse après le test tribologique

acier	La masse (g)	
	avant la tribologie	après la tribologie
K100	35.3901	35.3898
K110	23.1106	23.1099

3.4.1 Discussion :

D'après les figures en remarque que la longueur de trace d'usure de K100 (721.83 μm) est plus grande que K110 (558.64 μm) ca veut dire que le K110 il a une bonne résistance tribologique que le K100 et le tableau de perte de la masse confirme ce que je dis.

Conclusion Générale :

Dans ce travail, un traitement de boruration en poudre a été réalisé sur des aciers à outils pour travail à froid BÖHLER-K100 et K110a une température de 1000°C et 1050°C avec variation de temps de maintien de 4h et 8h. En utilisant un mélange de poudre de 20% B₄C, 75% SiC et 5% NaBF₄ (massique).

Le traitement thermochimique de boruration sur des aciers à outils pour travail à froid BÖHLER-K100 et K110 a pour objectif d'acquérir une amélioration des propriétés mécaniques

L'étude microstructurale par microscope optique après boruration nous a confirmé la formation d'une couche de boruration 260µm pour l'échantillon K100 et 130µm pour l'échantillon K110 a un temps de maintien de 6h,

L'étude tribologique a permis de comprendre les mécanismes d'usure ou une usure abrasive à trois corps et une usure adhésive et comparé les résultats entre les deux aciers.

Références

- [1] Acier Carbone : Composition, Types & Applications.....(2024). récupéré February 20, 2024, depuis ton-couteau.fr/blogs/forge/acier-au-carbone
- [2] Acier - Aperçu de la composition, des avantages et..... (2024). récupéré February 20, 2024, depuis www.techno-science.net
- [3] SINGH Ramesh, Classification of Steels, CHAP 6 (2012), P 51
- [4] Bensaada Saïd, Classification Des Aciers Et Des Fontes, Université de Biskra, (2019), P200-214
- [5] BENE Inox, Pourquoi Utilise L'acier Inoxydable, Fiche Techniques, Saint Priest, (2017), P 03.
- [6] NICOLAS Bouquet, Etude De La Formation Des Joints Soudes Par Diffusion, Université de BOURGOGNE, (2014), P 14
- [7] DAMSTAHL STAINLESS STEEL, « L'acier Inoxydable Ferritiques », [EN LIGNE], [www.damstahl.fr/la-connaissance-de-lacier-inoxydable/quest-ce-que-lacierinoxydable/lacierinoxydable-ferritique], (29/04/202).
- [8] BENE INOX, POURQUOI UTILISE L'ACIER INOXYDABLE, FICHE TECHNIQUES, SAINT PRIEST, (2017), P 20.
- [9] Bensaada Saïd, CLASSIFICATION DES
- [10] Bensaada Saïd, DIAGRAMME FER-CARBONE, UNIVERSITE DE BISKRA (2016), P 92
- [11] N. BOUAOUADJA; " Matériaux Tome 1 matériaux métalliques" OPU, p 278-279, 1992.
- [12] L.LAKHTINE; "Métallographie et traitements thermiques des métaux" 4em ed. Mir - Moscou, p331-336, 1978. ACIERS ET DES FONTES, UNIVERSITE DE BISKRA, (2019), P 200-218.
- [13] A.K. SINHA, BORONIZING, HEAT TREATMENT- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, VOL. 4 (1991), P 437.
- [14] J.BARRALIS, L.CASTEX, J.-C.CHAIZE, INFLUENCE DES CONDITIONS DE TRAITEMENT SUR LA DISTRIBUTION DE PHASES ET DES CONTRAINTES RESIDUELLES DANS LES COUCHES NITRUREES-MEMOIRES ET ETUDES SCIENTIFIQUES REVUE DE METALLURGIE, (1986), P 629-642.
- [15] A.K. SINHA, BORONIZING, HEAT TREATMENT- ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, VOL. 4 (1991), P 437.
- [16] MESSAOUI MOSBAH, SUPPORT DECOURS MATERIAUX METALLIQUES, INSTITUT SUPERIEUR DES ETUDES TECHNOLOGIQUES DE GAFSA, (2014-2015)
- [17] PERFORME GUIDE D'AUTO APPRENTISSAGE POUR LES OPERATEURS DE TRAITEMENT THERMIQUE, QUEBEC (2015), P 54.

[18] ATHMANI MOUSSA, AMELIORATION DES PROPRIETES DE SURFACE D'UN ACIER A OUTILS DE TRAVAIL A CHAUD PAR DES TRAITEMENTS THERMIQUES ET THERMOCHIMIQUES (CEMENTATION), UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA (2011).

[19] BENSADA SAÏD, TRAITEMENT THERMIQUE ET CLASSIFICATION DES ACIERS ET FONTES, UNIVERSITE DE BISKRA, P 79-87

[20] Procopio, a T. & Barsoum, M. W. Characterization of Ti 4 AlN 3. Metall. Mater. Trans. A 31, 333–337 (2000).

[21] <https://www.bodycote.com/fr/service/traitements-thermiques/cementation-suivie-dune-trempe/carbonitruration/>

[22] Nait Zahra, M. A. Caractérisation physico-chimique , calculs thermodynamiques des phases et simulation de la cinétique de croissance des couches de borures formées sur des substrats métalliques. (2012).

[23] Martini, C., Palombarini, G. & Carbucichio, M. Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron. J. Mater. Sci. 39, 933–937 (2004)

[24] Kayali, Y., Büyüksaçış, A. & Yalçın, Y. Corrosion and wear behaviors of boronized AISI 316L stainless steel. Met. Mater. Int. 19, 1053–1061 (2013).

[25] Gunes, I. et al. Investigation of diffusion kinetics of plasma paste borided AISI 8620 steel using a mixture of B₂O₃ paste and B₄C/SiC. Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci. 38, 513–526 (2013).

[26] J. BRANDSTÖTER, W. LENGAUER, JOURNAL DES ALLIAGES ET COMPOSES, 262 - 263 (1997), P 390.

[27] A.K. Sinha, Boriding (Boronizing), ASM International, ASM Handbook., 4 (1991) 437-447.

[28] E. Atık, U. Yunker, C. Meriç, The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels, Tribology International, 36 (2003) 155-161.

[29] G. Kartal, O. Kahvecioglu, S. Timur, Investigating the morphology and corrosion behavior of electrochemically borided steel, Surface and Coatings Technology, 200 (2006) 3590-3593.

[30] S. Taktak, Tribological behaviour of borided bearing steels at elevated temperatures, Surface and Coatings Technology, 201 (2006) 2230-2239

[31] ACIER PREMIUM, COLD WORK STEEL BÖHLER, [EN LIGNE], [WWW.FR.ABRAMS-INDUSTRIES.COM/ACIER/PREMIUM-1237], (14/02/2021).

[32] <https://www.voestalpine.com/boehler-edelstahl/de>

