

République Algérienne Démocratiques Populaire
Ministère d'Enseignement Supérieure
et Recherche Scientifique

UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire

Présenté pour Obtenir du Diplôme
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies.

Spécialité : Ingénierie des Matériaux et des Surfaces (IMS)

Réalisé par :

Moali Makhoulf

Bouhallab Abdelhakim

Encadré par :

Pr.Bacha Nacer-Eddine

Thème

Traitement Thermique des Aciers fortement alliés
Acier travail à froid AISI/D2

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. Boudina	MCA	Président	USD Blida 1
Dr. Abderrahmane	MCA	Examineur	USD Blida 1
Dr. Djerdjough	MCA	Examineur	USD Blida 1

Soutenu le : 29/06/2025

Année universitaire 2024/2025



Remerciements

Je remercie tout d'abord le bon dieu de m'avoir donné la force, la volonté et le courage pour l'élaboration de ce travail. Je remercie mon promoteur Pr. Nacer Eddine BACHA ur avoir bien voulu m'encadrer et pour ses précieux conseils et orientations. Mes remerciements vont également à tous mes enseignants, particulièrement les enseignants de la spécialité Ingénierie des matériaux et des Surfaces ainsi que tous les responsables et le personnel du la faculté de Génie mécanique. J'adresse mes plus vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Moati Makhlouf

Bouhallab Abdelhakim





Dédicace

*À la mémoire de ma mère, source d'amour et de savoir,
Je dédie ce travail en guise de reconnaissance et en espérant qu'il soit une aumône continue
pour son âme.*

Que Dieu lui accorde Sa miséricorde et le Paradis éternel.

À mon père bien-aimé, pilier de ma vie et source inépuisable de force,

*Que ce modeste travail soit un témoignage de ma profonde reconnaissance pour ton soutien
indéfectible.*

À mon frère : Abdel-aaziz, À mes chères sœurs : Fatima, Houria, et Ratiba

À ma femme, À ma fille Meriem, À mon fils Anes,

*À tous mes amis. À toute la promotion 2025 d'Ingénierie des matériaux et des surfaces
de département génie mécanique d'université Saad Dahleb Blida 1, À tous ceux qui par
leur sourire, leur gentillesse et espoir, m'ont Encouragé à poursuivre mes études.*

Moali Makhlouf

*Je dédie ce modeste travail avec toute mon affection aux êtres, qui me sont très chers au monde
mes parents.*

À mes chers frères.

À mes chères sœurs.

À tous mes oncles et tantes, cousins et cousines.

À tous mes amis.

*À toute la promotion 2025 d'Ingénierie des matériaux et des surface de département génie
mécanique d'université Saad Dahleb Blida 1*

*À tous ceux qui par leur sourire, leur gentillesse et espoir, m'ont Encouragé à poursuivre mes
études.*

Bouhallab Abdelhakim



الملخص:

تعرف السبائك ذات المحتوى العالي من الكروم، مثل فولاد D2 ، بقدرتها الممتازة على التصلب ومقاومتها العالية للتآكل، بالإضافة إلى كونها اقتصادية. وعلى الرغم من هذه المزايا، فإن هذه الأنواع من الفولاذ قد تكون عرضة لفشل مبكر، مثل تقشر حواف القطع، والذي يُعزى جزئيًا إلى وجود الأوستنيت المتبقي بعد التصلب. إذ يمكن أن تؤثر هذه الطور المتبقية على الصلابة والمتانة، مما يستدعي تحسين عمليات المعالجة الحرارية. يُستخدم التقسية المزدوجة بشكل شائع لتحويل الأوستنيت المتبقي إلى مارتنيسيت، مما يساعد على استقرار البنية المجهرية وتحسين الخواص الميكانيكية. يتم تطوير الخواص الميكانيكية المرغوبة لفولاذ الأدوات المستخدم في التشكيل على البارد من خلال المعالجات الحرارية التي تعدل البنية المجهرية لضبط الصلادة، والمتانة، ومقاومة التآكل. تم تحسين المعالجات الحرارية لفولاذ D2 باستخدام معايير مختلفة لعمليات التصلب والتقسية. تم استخدام المجهر الضوئي والإلكتروني المزود بمسبار EDS لتحليل البنية المجهرية، كما تم قياس صلابة روكويل لكل تجربة. أظهرت النتائج أن المعالجة في درجة حرارة 1020 درجة مئوية لمدة 40 دقيقة، تليها عملية تقسية مزدوجة عند 150 درجة مئوية لمدة 40 دقيقة لكل مرحلة، تؤدي إلى الحصول على قيم صلابة مثالية لفولاذ D2 المستخدم في صناعة سكاكين الجزارة.

RESUME

Les alliages à haute teneur en chrome, tels que le D2, se distinguent par leur excellente trempabilité et leur résistance à l'usure, tout en étant économiquement avantageux. Malgré ces avantages, ces aciers peuvent être sujets à des défaillances prématurées, telles que l'écaillage des arêtes de coupe, causées en partie par la présence d'austénite résiduelle après la trempe. Cette phase rémanente peut altérer la dureté et la ténacité, ce qui nécessite l'optimisation des traitements thermiques. Le double revenu est couramment utilisé pour transformer l'austénite résiduelle en martensite, ce qui permet de stabiliser la microstructure et d'améliorer les propriétés mécaniques. Les propriétés mécaniques souhaitées des aciers à outils pour travail à froid sont développées par des traitements thermiques qui modifient la microstructure afin d'ajuster la dureté, la ténacité et la résistance à l'usure.

Des traitements thermiques ont été optimisés l'acier outil D2 en utilisant différents paramètres opératoire de trempe et de revenu. La microscopie optique et électronique muni d'une sonde EDS ont été utilisées pour caractériser la microstructure, la dureté Rockwell a été mesurée pour chaque expérience.

Les résultats ont montré qu'une mise en solution à 1020 °C avec un maintien de 40 minutes suivi d'un double revenu à 150 °C et 40 minutes de maintien permet d'obtenir des valeurs de dureté optimales pour l'acier outil D2 destiné pour la fabrication de couteaux de boucherie.

Abstarct :

High-chromium alloys, such as D2 steel, are known for their excellent hardenability and wear resistance, while also being economically advantageous. Despite these benefits, such steels can be prone to premature failures, such as edge chipping, partly due to the presence of retained austenite after quenching. This residual phase can negatively affect both hardness and toughness, necessitating the optimization of heat treatment processes.

Double tempering is commonly used to transform retained austenite into martensite, which helps stabilize the microstructure and improve mechanical properties. The desired mechanical properties of cold-work tool steels are developed through heat treatments that modify the microstructure to adjust hardness, toughness, and wear resistance.

In this study, heat treatment of D2 tool steel was optimized using different quenching and tempering parameters. Optical and electron microscopy, equipped with an EDS probe, were used to characterize the microstructure, and Rockwell hardness was measured for each test condition.

The results showed that a solution treatment at 1020 °C for 40 minutes, followed by double tempering at 150 °C for 40 minutes each, yields optimal hardness values for D2 tool steel intended for butcher knife manufacturing.

Mots clés:

Traitement thermique, trempe, revenue, carbure, acier travail a froid, Dureté, dissolution.

Liste des figures

Figure 1.1: Etapes essentielles en traitement thermique
Figure 1.2: Exemples des pièces trempées [3]
Figure 1.3 : Types de revenu
Figure 1.4 : Différents cycles thermiques de recuit.
Figure 1.5 Diagramme TRC
Figure 1.6 : Diagramme TTT (T: Transformations, T: Température, T: Temps)
Figure 1.7: Diagramme d'équilibre Fe-C [1]
Figure 1.8: Diagramme d'équilibre Fe-Cr-C à 13 % de chrome [2]
Figure 1.9: Structure d'un acier lédeburitique à l'état brute de coulée [6]
Figure 1.10: Courbe établie par A.KULMBURG, donnant le volume de carbure en fonction de la teneur en carbone pour un alliage à 12 % de chrome. [2]
Figure 1.11: Classes structurales des aciers dans le système Fe-C-Cr (I- Acier ferritique ; II- Acier demi-ferritique ; III- Acier lédeburitique; IV- Acier hypereutectoïde ; V- Acier hypoeutectoïde [5]
Figure 2.1 : La micrographie de D2 à l'état de recuit
Figure 2.2: Tronçonneuse à disque.
Figure 2.3: Echantillon destiné pour le traitement thermique.
Figure 2.4: Polisseuse métallographique.
Figure 2.5: Microscope optique.
Figure 2.6: Microscope électronique à balayage
Figure 2.7: Four à moufle Nabertherm
Figure 2.8: Four de revenu
Figure 2.9: Duromètre Rockwell.
Figure 3.1: Diagramme de traitement thermique du D2 à une T=950 °C, 40 min.
Figure 3.2: Organigramme des traitements thermiques réalisés à T= 950 °C, 40 minutes.
Figure 3.3: Coupe métallographique des échantillons trempés de 950 °C, 40min et trempé à l'huile puis revenu à 400 °C, 40 min.
Figure 3.4: Diagramme de phase Fe-C d'un acier Outil D2 [3p]
Figure 3.5 : Coupe métallographique des échantillons trempés de 950 °C, 40min et trempé à l'huile puis revenu à 400 °C, 40 min.
Figure 3.6: Schéma de traitement thermique d'une austénitisation à 1020 °C avec un seul revenu à respectivement 150 °C, 250 °C et 500 °C.
Figure 3.7 : Changement dans la fraction du volume des micro-constituants après trempe de l'acier D2 à différentes températures d'austénitisation. [12]
Figure 3.8: Histogramme des duretés moyennes du tableau 3.3
Figure 3.9: Microstructure d'un échantillon traité de 1020 °C, trempé à l'huile, revenu 150 C
Figure 3.10: Microstructure d'un échantillon traité de 1020 °C, trempé à l'huile, revenu 500C
Figure 3.11 : Schéma de traitement thermique d'une austénitisation à 1020 °C avec double revenu à respectivement 150 °C durant 40 minutes.
tableau 3.4, les échantillons sont mis en solution à 1020 °C et maintenu pendant 40
Figure 3.12: Microstructure d'un échantillon trempé de 1020 °C + 2 revenus à 150 °C.

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Composition chimique d'un acier à outils D2
Tableau 3.1: Duretés des échantillons trempés de 950 °C et revenu à 400°C.
Tableau 3.2: Duretés des échantillons trempés de 1020 °C sans revenu dans différents
Tableau 3.3 : Duretés des échantillons trempés de 1020 °C et pour un seul revenu à 150 °C, 250 °C et 500 °C

Sommaire

1. Introduction Générale	1
CHAPITRE 1 : TRAITEMENT THERMIQUE DES ACIER	
1.1. Introduction	3
1.2 Éléments d'un traitement thermique	4
1.3 Définition d'un traitement thermique.....	4
1.4 Les éléments d'un traitement thermique	4
1.5 Phases essentielles en traitement thermique.....	4
1.6 Le classement des traitements thermiques.....	5
1.7 Les procédés	5
1.8 Les défauts de trempe	7
1.9 Le recuit.....	8
1.10 Le diagramme TRC.....	9
1.11 Le diagramme TTT :.....	10
1.12 Défauts de traitement thermique de l'acier.....	11
1.13 Fabrication des aciers à outils.....	12
1.13.1 Structure de solidification.....	13
1.13.2 Classes structurales des aciers dans le système Fe - C- Cr.....	16
1.13.3 Usinabilité.....	18
1.13.4 Réponse au traitement thermique.....	18
1.13.5 Aptitude à la rectification.....	18
1.13.6 Classification des aciers à outils.....	18
1.13.6.1 Aciers alliés de travail à froid.....	19
1.13.7 Propriétés principales désirées.....	20
CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE EXPERIMENTAL	
2.1. Présentation des matériaux étudiés.....	22
2.1.1 Composition chimique.....	22
2.1.2 La microstructure.....	22
2.1.3 La dureté.....	22
2.3 Préparation des échantillons	23
2.4. Polissage	23
2.5. Attaque chimique.....	24
2.6. Observation microscopique	24
2.7. Fours de traitement thermique.....	26
2.8. Essais mécaniques : dureté (Rockwell)	28

CHAPITRE 3 : RESULTATS & DISCUSSION

3.1 Introduction29

3.2 L’acier D2 à l’état de réception29

3.3 Protocole de traitement thermique.....30

CONCLUSION :43

Référence Bibliographie.....

1. Introduction Générale :

L'acier est considéré comme le matériau d'ingénierie le plus complexe et le plus utilisé en raison de la présence de fer dans la croûte terrestre, de sa température de fusion élevée, de ses diverses propriétés mécaniques et de sa phase de transformation par variation de sa vitesse de refroidissement. Le chauffage du minerai de fer et du charbon de bois dans une forge est connu pour être le premier alliage de fer. Auparavant, lorsque la technologie de l'acier allié a commencé à émerger il a été montré comment, par le passé, la recherche sur l'acier allié portait principalement sur l'évolution du procédé de fonderie de l'acier allié. Le premier acier allié et auto-trempé a été inventé en 1868. Par la suite, d'autres chercheurs ont introduit une nouvelle méthode pour améliorer la déphosphoration lors du procédé Bessemer. Sa méthode est particulièrement adaptée à la production d'acier à partir de fonte riche en phosphore. Dans une autre étude majeure, il a été mentionné que l'acier 52100 est l'un des premiers alliages développés pour une utilisation commerciale. De nombreux matériaux d'application pour roulements, composés de 1 % de carbone et de 1,5 % de chrome, subissent un processus de durcissement et de trempe, puis sont revenus, ce qui donne une microstructure de martensite revenue et de cémentite fer-chrome (M₃C), bien connue pour sa dureté modérée de 600 à 1 000 HV. [1]

1) Les aciers à outils pour travail à froid, utilisés dans des procédés de mise en forme tels que le poinçonnage, le formage, le laminage et la découpe, sont essentiels à la fabrication d'outils capables de résister à des conditions de service sévères. Travaillant à des températures inférieures à 150 °C, ces aciers doivent offrir une combinaison de propriétés mécaniques, notamment une dureté élevée, une résistance à la compression, une ténacité, une stabilité dimensionnelle et une bonne usinabilité. Cependant, ces propriétés sont souvent contradictoires, nécessitant des compromis pour garantir la performance et la durabilité des outils. Parmi ces aciers, ceux fortement alliés au Cr, comme l'acier D2, qui se distinguent par leurs excellentes capacités de trempe et leur résistance à l'usure, tout en étant économiquement avantageuses. Malgré ces avantages, ces aciers peuvent subir des défaillances prématurées, telles que l'effritement et l'écaillage des arêtes tranchantes, causées en partie par la présence d'austénite résiduelle après la trempe. Cette phase rémanente peut altérer la dureté et la ténacité, rendant nécessaire l'optimisation des traitements thermiques. Les propriétés mécaniques souhaitées des aciers à outils pour travail à froid sont développées grâce à des traitements thermiques, incluant la trempe, le revenu et parfois un traitement cryogénique, qui modifient la microstructure pour ajuster la dureté, la ténacité et la résistance à l'usure. Cette étude se concentre sur l'impact des traitements thermiques, notamment le double revenu, sur la transformation de l'austénite

résiduelle dans l'acier D2. L'objectif est d'optimiser la microstructure et d'améliorer les propriétés mécaniques des outils fabriqués à partir de cet acier pour des applications industrielles exigeantes. [2]

- 1) Nous aborderons notre travail par une étude bibliographique dans le chapitre 1, les exigences que requiert un acier à outil, les traitements thermiques qu'il doit subir pour répondre adéquatement à celles-ci, la trempabilité et leur influence sur les aciers à outils.
- 2) Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les méthodes et moyens de recherche utilisés.
- 3) Le troisième chapitre de cette étude est réservé aux résultats expérimentaux, leurs analyses et la conclusion finale.

CHAPITRE
TRAITEMENT THERMIQUE DES
ACIERS

1.1. Introduction

Les spécifications de l'acier à outil ont été développées au fil des ans, principalement pour les applications d'usinage à grande vitesse, mais aussi pour la production d'outils et de matrices. Les caractéristiques varient selon chaque nuance, mais les propriétés communes incluent une résistance élevée à l'usure et une excellente ténacité. Les nuances d'acier rapide présentent également une résistance élevée à l'adoucissement à des températures élevées, jusqu'à 500 °C, ce qui les rend idéales pour une utilisation à grande vitesse, d'où leur nom. Avec un traitement thermique, ces aciers peuvent atteindre une dureté Rockwell élevée. Par exemple, l'acier rapide M2 est généralement trempé jusqu'à 64 HRC, tandis que le M42 peut être trempé jusqu'à 70 HRC, bien que généralement trempé entre 66 et 68 HRC. La composition chimique des nuances d'acier outil combine tout ou partie des éléments d'alliage suivants : carbone, chrome, molybdène, vanadium, tungstène et cobalt. Les nuances combinant carbones, vanadium et tungstène offrent une résistance à l'usure exceptionnelle. Les nuances au cobalt offrent une dureté à chaud et une résistance au revenu améliorées, mais une ténacité moindre. [1]

En 1868, Robert Mushet inventa un acier auto-trempant/trempant à l'air, connu sous le nom d'acier Mushet ou acier spécial R Mushet. Il s'agissait du premier acier spécial connu qui, une fois forgé et refroidi, acquérait une certaine dureté. Largement utilisé pour les outils d'ingénierie, il était breveté à l'époque et sa composition chimique était tenue secrète. On sait aujourd'hui qu'une teneur de 8 % en tungstène était essentielle à ses caractéristiques. En 1870, Samuel Osborn & Company de Sheffield, au Royaume-Uni, acquit les droits de fabrication de cet acier pour une production de masse. [2]

Au tournant du XIXe siècle, l'Américain Frederic Taylor et le Britannique Maunsel White, travaillant aux États-Unis à la Bethlehem Steel Company en Pennsylvanie, effectuèrent de nombreux tests et expériences sur l'acier Mushet afin d'en comprendre les caractéristiques. Au cours de ces expériences, ils découvrirent que l'ajout de 3,8 % de chrome à l'acier à 8 % de tungstène permettait de le tremper et de le revenu à haute température (proche du point de fusion de l'acier). En service, il pouvait travailler à des vitesses bien plus rapides que l'acier Mushet, d'où son nom d'acier rapide.

Le T1 fut l'un des premiers aciers rapides produits en série. Développé et fabriqué à partir de 1910, il était alors breveté par Crucible Steel Co, New Jersey, États-Unis. L'acier rapide au tungstène-molybdène M2 fut inventé par W. Breelot [3] aux États-Unis en 1937.

1.2 Éléments d'un traitement thermique [4]

Le traitement thermique consiste à jouer sur trois éléments principaux:

- La température
- Le temps
- Le lieu de séjour durant le maintien en température

1.3 Définition d'un traitement thermique

La définition retenue par la norme NF EN 10052 pour traitement thermique est une succession d'opérations au cours desquelles un produit ferreux solide est soumis en totalité ou partiellement à des cycles thermiques pour obtenir un changement de ses propriétés et/ou de sa structure.

1.4 Les éléments d'un traitement thermique

En général, la phase déterminante et critique est le refroidissement. La vitesse appropriée pour obtenir les caractéristiques voulues amène à choisir un milieu de refroidissement (par exemple air, eau, bain de sel, huile, gaz ou mélanges gazeux sous pression) en fonction de la dimension de la pièce à traiter et la trempabilité.

Les caractéristiques de mise en œuvre et d'emploi sont concernées

On recherche un compromis entre les caractéristiques suivantes:

- Ductilité (capacité de déformation)
- Résilience, ou ténacité (résistance au choc)
- Résistance (limite d'élasticité, résistance à la traction)
- Dureté

Certaines structures sont favorables à la dureté, certaines caractéristiques (taille de grains) en conjonction avec d'autres paramètres agissent sur la ductilité. Cette approche simplifiée ne reflète pas, bien entendu, toute la complexité de la métallurgie et de sa mise en œuvre au travers des traitements que nous décrivons.

1.5 Phases essentielles en traitement thermique

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (voir figure 1.1):

- ✓ AB: L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation
- ✓ BC: Maintien à une température définie.
- ✓ CD: Refroidissement avec une vitesse:

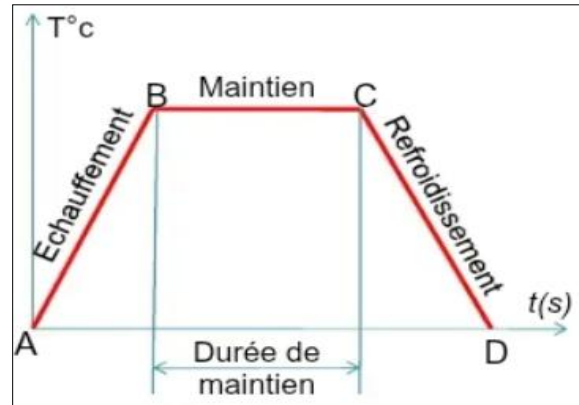


Figure 1.1: Etapes essentielles en traitement thermique [4]

- Lente (dans le four, à l'air).
- Assez rapide (dans l'huile).
- Très rapide (dans l'eau).

On recherche un compromis mis entre les caractéristiques suivantes: ductilité, résilience, dureté, résistance à la corrosion et stabilité dimensionnelle.

1.6 Le classement des traitements thermiques

a. Traitement en masse

- Trempe
- Revenu
- Recuit

b. Traitement superficiels

- Durcissement par trempe après chauffage superficiels
- Induction électromagnétique
- Flamme
- Laser

c. Traitement thermochimique

- Diffusion d'élément non métallique
- Diffusion d'élément métallique

Température suivi d'un refroidissement rapide et continue. Il est possible de réaliser des trempes "locales" ne s'appliquant qu'à une partie d'une pièce.

Les types de trempe:

1. la trempe dans la masse.
2. la trempe superficielle.

1.7. Les procédés

Le procédé de traitement thermique de la trempe se compose de:

1. Chauffage lente jusqu'au point de transformation (A_3+50).

2. Maintient en température.
3. Refroidissement rapide.

Le durcissement par trempe se déroule en trois étapes:

- a. L'austénitisation: Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques (α , cc) en austénite (γ , cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.
- b. La trempe: consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitiques et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite. la transformation martensitique se produit sans aucune diffusion. Elle commence sur certains plans cristallographiques particuliers, et avance par rabattement des atomes dans les plans voisins de même orientation.
- c. Le durcissement par trempe des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés:

Mode de refroidissement:

Pour provoquer ce refroidissement rapide on utilise des fluides, dits fluides de trempe, Les fluides utilisés par ordre de vitesse de refroidissement (de la plus élevée à la plus faible) sont:

- L'eau salée en ajoutant environ 10% de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure.
- L'eau
- L'eau additive
- L'huile
- Le brouillard d'eau
- Les gaz (air, argon, azote, etc.)

Exemples des pièces trempées :



Figure 1.2: Exemples des pièces trempées [4]

1.8 Les défauts de trempe

Les défauts sont généralement provoqués par des irrégularités de chauffage:

- Le brûlage: Destruction par le feu
- La décarburation : Réduction du taux de carbone dans la fonte ou l'acier
- Les tapures: Fissures qui surviennent dans une pièce lors d'un réchauffement ou refroidissement trop rapide.

Une trempe a pour objet de durcir le métal. Elle permet d'obtenir des aciers très durs mais dans la plupart des cas peu ductiles. Elle est donc généralement suivie d'un revenu.

1.9 Le revenu

Le revenu est un traitement thermique consistant à réchauffer l'acier après trempe afin de lui faire perdre graduellement sa dureté primitive et sa fragilité. Il atténue en partie ou en totalité les effets de la trempe.

Le revenu se pratique après une trempe. La méthode consiste à chauffer la pièce à une température inférieure à celle de la trempe, température déterminée en fonction du type de matériau, et de refroidir cette pièce plus ou moins lentement.

- en un ou plusieurs chauffages de la pièce à une température déterminée (inférieure à la température de début de transformation de phase de l'acier - 700°C).
- un maintien de la pièce à cette température pendant un temps donné.
- un refroidissement approprié.

Un revenu permet d'atténuer les effets de la trempe en rendant la pièce plus ductile et plus tenace. Il peut dans des cas particuliers permettre un durcissement secondaire. L'emploi du terme revenu sous-entend que le traitement est réalisé sur un état préalablement trempé. Un traitement à 500°C sur un acier trempé est un revenu, sur un acier non traité est un recuit.

Le Revenu consiste:

- 1- Un ou plusieurs chauffages de la pièce à une température déterminée (inférieure à la température de début de transformation de phase de l'acier $\sim 700^{\circ}\text{C}$).
- 2- Un maintien de la pièce à cette température pendant un temps donné.
- 3- Un refroidissement approprié.

Les types de revenu sont (voir figure 1.2):

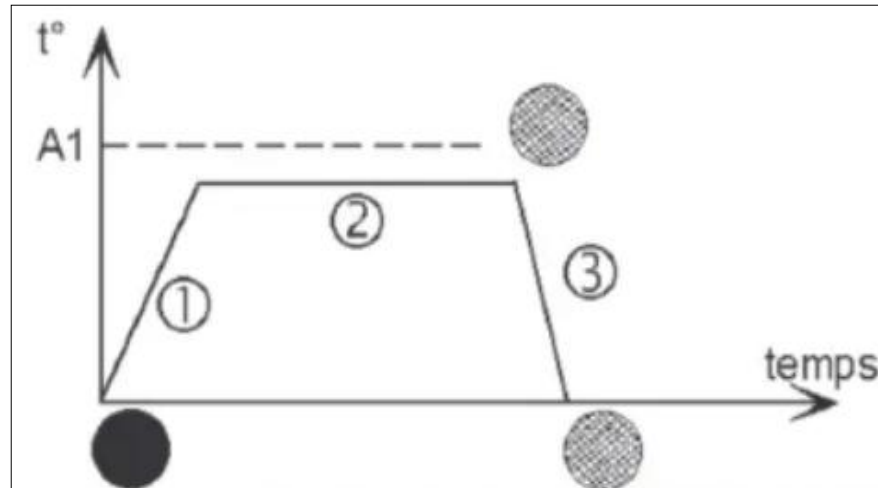


Figure 1.3 : Types de revenu [4]

- a. Détente: S'effectue à une température entre 140°C et 200°C à pour but de diminuer les contraintes internes et relever la limite d'élasticité.
- b. Adoucissement: S'effectue à une température entre 450°C et 600°C à pour but de la décomposition complète de la martensite par précipitation du carbone sous forme de cémentite Fe₃C.

1.9 Le recuit

L'acier est chauffé pendant un temps plus ou moins long, puis est laissé se refroidir lentement. Dans le but de restaurer des propriétés originales du matériau. Recuits, visent à amener le métal vers un équilibre structural et mécanique. Ils ont donc pour but de faire disparaître les états hors équilibre résultant des traitements antérieurs, thermiques ou mécaniques.

Un cycle thermique de recuit comprend 3 phases:

- Une phase de chauffage jusqu'à une température dite température de recuit qui dépend de type de **AC₃** recuit à réaliser.
- Une phase de maintien isotherme à la température de recuit.
- Une phase de refroidissement très lente.

Les types de recuit, illustrés à la figure 1.3 sont énumérés ci-dessous.

- a. Le recuit d'homogénéisation: s'applique aux aciers bruts de fonderie pour lesquels le refroidissement a entraîné une mauvaise répartition des constituants. Il s'obtient en maintenant l'acier dans le domaine austénitique (solution solide γ) à une température aussi élevée que possible afin d'accélérer la diffusion du carbone et celle des autres éléments d'alliage.

- b. Le recuit de normalisation: sert à affiner le grain (le rendre plus petit) pour les pièces qui ont subi un grossissement de grain parce qu'ils étaient exposés à une température élevée lors d'une opération de forgeage, moulage ou soudage. Le traitement s'effectue, pour une durée de quelques minutes, entre 50 à 100°C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique.
- c. Le recuit d'adoucissement: est pratiqué sur les pièces trempées pour faciliter ensuite leur usinage et formage. La température de traitement est entre 50 à 100°C au-dessus de la limite inférieure du domaine austénitique. On peut obtenir le même résultat par un revenu à une température en-dessous de la température de transformation a-y pendant environ 15h.
- d. Le recuit de recristallisation: C'est un recuit à faire recristalliser un acier pour obtenir un grain plus fin, après un recuit de stabilisation. On l'utilise également pour régulariser les effets des contraintes provoquées par la déformation.
- e. Le recuit de détente: remet l'alliage en équilibre mécanique en diminuant les contraintes résiduelles (contraintes internes) résultant d'un travail à froid ou d'une opération de soudage.

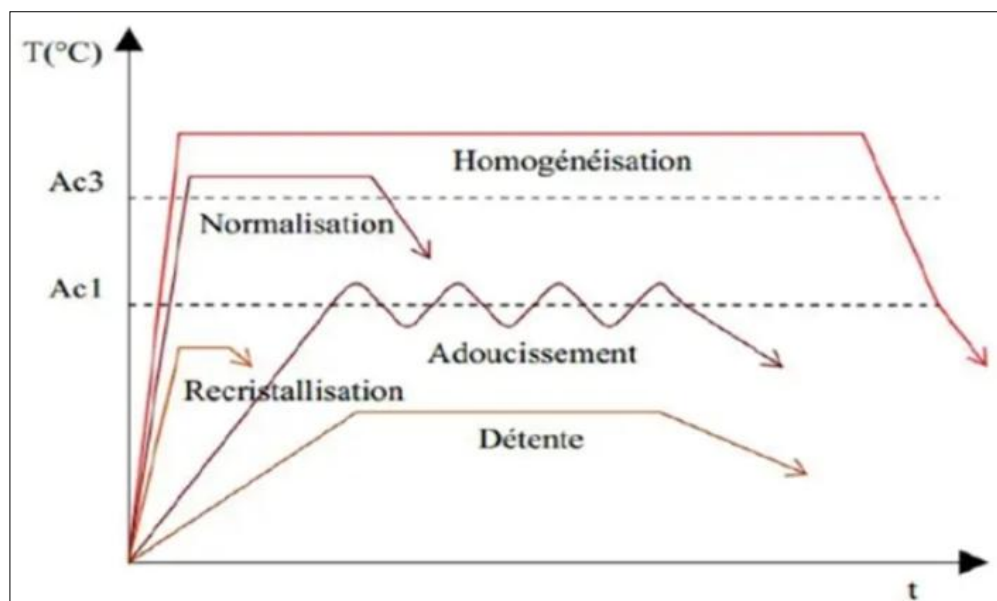


Figure 1.4 : Différents cycles thermiques de recuit. [4]

1.10. Le diagramme TRC : montré à la figure 1.4:

La vitesse de refroidissement conditionne chaque traitement thermique de l'acier. Le diagramme TRC donne pour un acier préalablement austénite. Les structures et duretés que l'on peut obtenir selon diverses vitesses de refroidissement. [5]

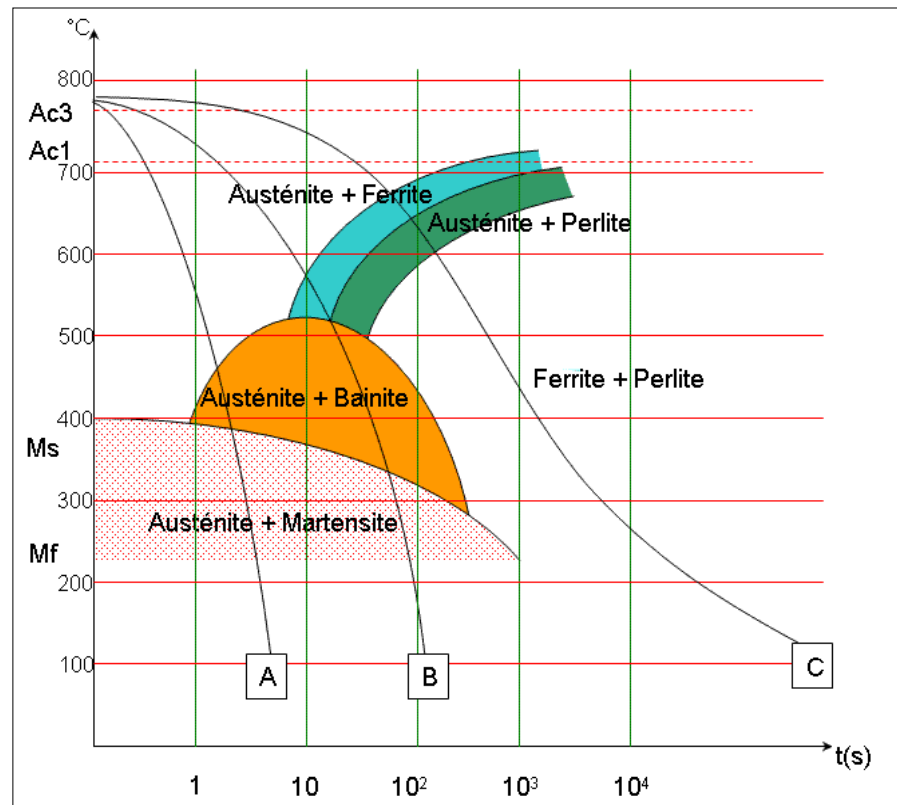


Figure 1.5 Diagramme TRC [5]

Utilité des courbes TRC

- Calcul des vitesses critiques
- Prévoir la structure micrographique (donc la dureté) dans une barre en fonction du mode de refroidissement.

1.11. Le diagramme TTT :

(T: Transformations, T: Température, T: Temps) est montré à la figure 2.5. Il permet de prévoir les phases présentes dans les microstructures après un traitement thermique. [6]

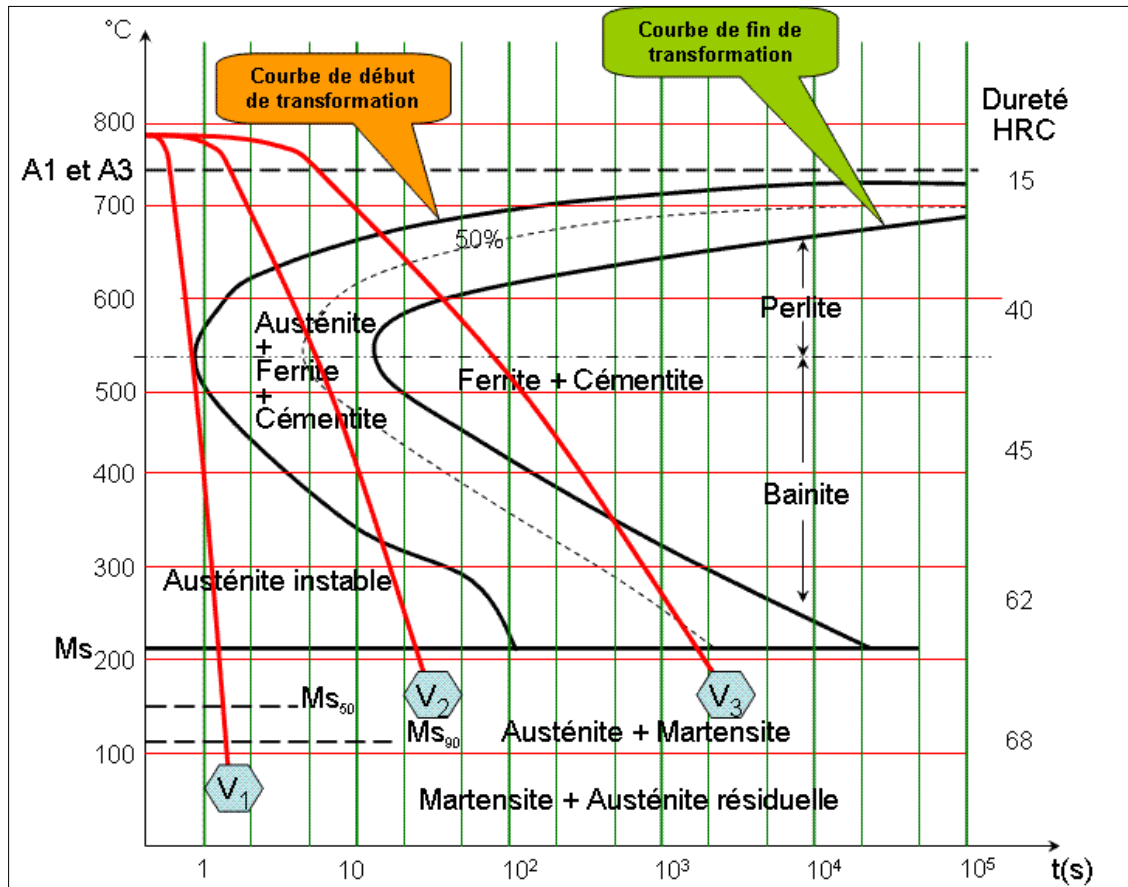


Figure 1.6 : Diagramme TTT (T: Transformations, T: Température, T: Temps [6])

1.12. Défauts de traitement thermique de l'acier

Parmi les défauts principaux qu'un traitement thermique peut produire il y a des tapures extérieures et intérieures, la déformation et le gauchissement.

a. Les tapures : Elles se forment le plus souvent au cours de la trempe lorsque les contraintes internes de traction du type I dépassent la résistance de l'acier à la décohésion. Les tapures apparaissent aux températures inférieures au point M_s , surtout après refroidissement.

L'aptitude à la formation des tapures s'accroît avec l'augmentation de la teneur de l'acier en carbone, l'élévation de la température de trempe et l'accélération du refroidissement dans l'intervalle de températures de la transformation martensitique. Elle augmente également avec l'amélioration de la pénétration de trempe.

Les tapures peuvent encore résulter de la concentration des contraintes élastiques locales. Cette concentration est favorisée par la modification brusque de la section de la pièce ou par des entailles, évidements, saillies, etc.

Les tapures sont un défaut incorrigible. Pour parer à leur formation, il est recommandé:

- 1) en établissant le projet des pièces, d'éviter au possible toutes sortes de saillies, d'angles vifs, de raccords brusques des sections épaisses avec des sections minces, etc.
- 2) dans le cas des pièces trempées à cœur, d'effectuer la trempe à partir des températures les plus basses possibles;
- 3) de refroidir lentement dans l'intervalle de températures martensitique en recourant à la trempe à deux bains et à la trempe martensitique;
- 4) d'utiliser la trempe isotherme;
- 5) de réaliser le revenu immédiatement après trempe.

b. Déformation et gauchissement :

La déformation, c'est-à-dire la modification des dimensions et de la forme de la pièce enregistrée au cours d'un traitement thermique, est l'effet des changements de volume provoqués par des transformations de phases, ainsi que des contraintes thermiques et structurales.

Il est fréquent qu'une déformation asymétrique des pièces s'appelle gauchissement (voilage). Le gauchissement s'observe surtout lorsque le chauffage est irrégulier et trop poussé, le positionnement de la pièce immergée défectueux et la vitesse de refroidissement trop grande dans l'intervalle de températures martensitique.

L'élimination de ces causes réduit nettement le gauchissement.

Pourtant, il est beaucoup plus difficile de parer au gauchissement des pièces longues et minces. Pour le diminuer, on serre les pièces de ce type avant refroidissement dans des estampes, sous des presses et sur des dispositifs variés. Les meilleurs résultats sont obtenus avec la pièce placée dans une estampe ou un autre dispositif après refroidissement jusqu'à M_s . Nous avons déjà indiqué que pendant la transformation martensitique la résistance de l'acier diminue; en cet état il se prête aisément au dressage dans une estampe. [7]

1.13 Fabrication des aciers à outils

Aujourd'hui, la majeure partie des aciers à outils est élaborée au four à arc. Le four à induction conserve, l'avantage de la souplesse, permettant d'élaborer de petites quantités.

- Par oxydation du carbone de la fonte au moyen d'un oxyde de fer pour le premier.
- Par mélange et fusion de ferraille et de fonte pour le deuxième.

L'arc électrique s'amorce entre les électrodes et le métal ; il fournit ainsi la chaleur nécessaire à la fusion.

L'arc permet, en effet, d'atteindre des températures élevées, et le bain métallique peu profond, peut être brassé énergiquement.

Pour parfaire l'affinage, on ajoute de la chaux; ainsi; toutes les impuretés seront éliminées dans le laitier qui se formera à la surface du métal en fusion.

Les progrès réalisés ont permis d'accroître la taille des lingots :

des lingots supérieurs à 1 tonne sont réalisables.

Les mécanismes de solidification induisent inévitablement d'une part des ségrégations à l'échelle dendritique et à l'échelle du lingot et d'autre part des défauts (retassures...); leur hérédité se perpétue jusque dans le produit final.

On agit alors sur la cristallisation en cherchant à obtenir, dès la solidification, une réduction des ségrégations des éléments d'alliages et de carbone (brassage, vibration de lingots...)

1.13.1 Structure de solidification

Les structures de solidification des aciers à outils sont en général relativement complexes, notamment dans le cas des nuances hautement chargées en carbone et éléments carburigènes.

Il est bon de prendre comme base d'étude le diagramme fer - cémentite dit métastable. [8]

Au cours de la solidification de l'acier liquide, il peut se produire deux phénomènes différents selon la teneur en carbone :

- Pour une teneur en carbone inférieure à celle du point E, il commence à se former des cristaux de ferrite si $C < 0.5\%$, et des cristaux d'austénite si $C > 0.5\%$ (austénite proeutectique). Mais, dans tous les cas, la structure devient entièrement austénitique lorsque tout l'acier est solidifié :

- Pour une teneur en carbone supérieure à celle du point E, qui correspond en fait à la solubilité maximale du carbone dans l'austénite, il précipite en même temps que l'austénite un mélange eutectique de cristaux de carbures à base de fer appelé lédéburite,

voir figure 1. 1 (diagramme Fer-Carbone).

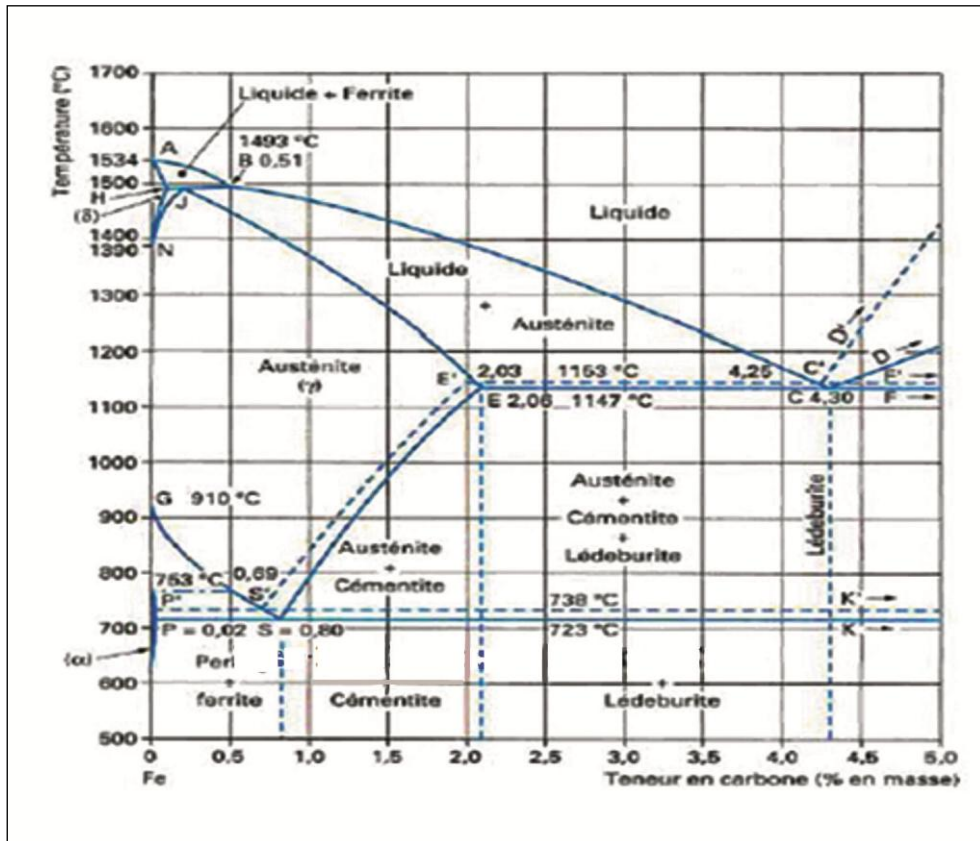


Figure 1.7: Diagramme d'équilibre Fe-C [8]

En présence de chrome, la structure de solidification n'est que très peu modifiée lorsque la teneur en cet élément est inférieure ou égale à 6%, le constituant lédeburitique qui peut se former avec une teneur en carbone élevée ($\geq 2\%$) est un carbure KC qui n'est autre qu'une cémentite substituée du type $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$. Par contre, lorsque la teneur en chrome est supérieure à 8%, il apparaît dans la lédeburite le carbure K2 qui est du type $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$.

L'addition de molybdène ou de vanadium à ce type d'acier se traduit par une substitution partielle de ces deux éléments dans le constituant lédeburitique.

Voir figure 1. 2 (diagramme d'équilibre Fe-Cr-C à 13% de chrome).

La structure de ce métal est caractérisée par la présence de carbures de formation et des propriétés différentes, on trouve : [9]

- d'une part : les carbures dits eutectiques $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$, qui sont formés au moment de la solidification. Ils sont insolubles dans la matrice de l'acier à toutes températures. Seules les transformations mécaniques à chaud peuvent en modifier la répartition et les dimensions.

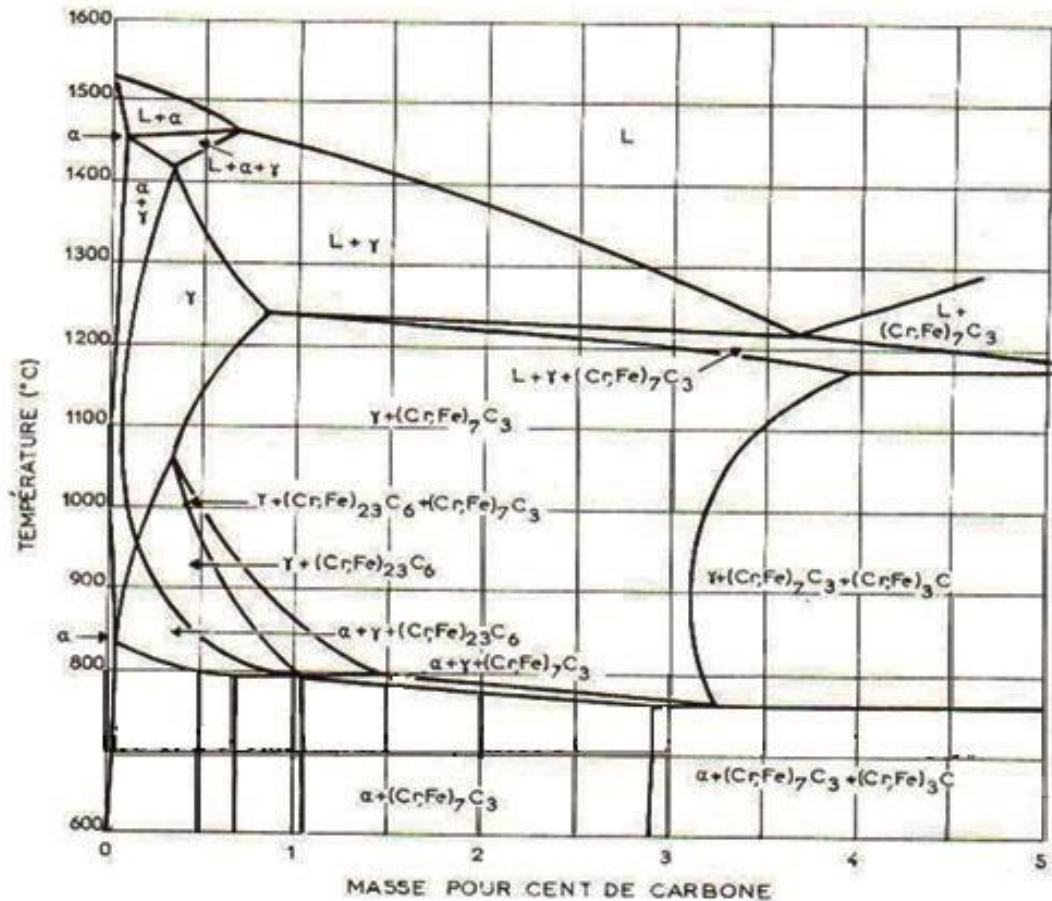


Figure 1.8: Diagramme d'équilibre Fe-Cr-C à 13 % de chrome [9]

- d'autre part les carbures $(Cr,Fe)_7C_3$ précipitent dans le métal solidifié au cours du refroidissement dans le domaine austénitique. Ce sont ces carbures qui peuvent être mis en solution au cours des chauffages d'austénitisation de façon d'autant plus complète que la température et le maintien sont élevés. A la trempe, ils restent en solution dans le métal martensitique et précipitent au revenu sous forme très fine.

Ce sont eux qui ont un rôle essentiel au cours des traitements thermiques, dont le mécanisme est commun à tous les aciers.

A l'inverse, les carbures de solidification (lédeburite) sont inertes.

La composition de phase à l'état brute de coulée est :

Ferrite alliée + lédeburite $[\alpha + (Cr,Fe)_7C_3]$ + carbure $(Cr,Fe)_7C_3$

La figure 1. 3, montre la structure d'un tel acier à l'état brute de coulée avant toute déformation.

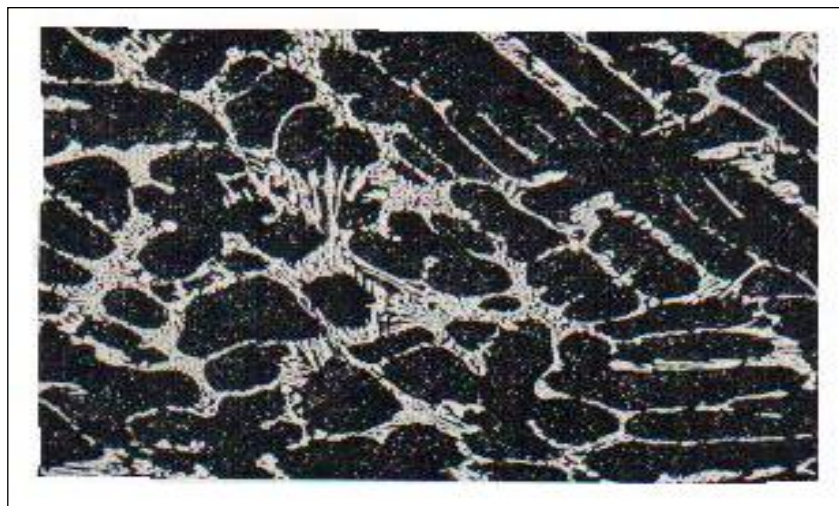


Figure 1.9: Structure d'un acier lédeburitique à l'état brute de coulée [10]

Les carbures eutectiques formés lors de la solidification se présentent dans le métal du lingot sous forme d'un réseau épais ayant une structure en lamelles et entourant les grains.

F.MARATRAY et S.BECHET proposent la relation suivante établie à l'aide d'un microscope quantitatif : $K\% = 11.3 C \% + 0.5 Cr \% - 13.4$ [11]

Relation entre le pourcentage de carbures primaires et les teneurs en carbone et en chrome.

Par ailleurs, A. KULMBURG [2] à établi une courbe donnant le volume de carbure formé en fonction de la teneur en carbone, pour un alliage à 12% de chrome (figure 1. 4).

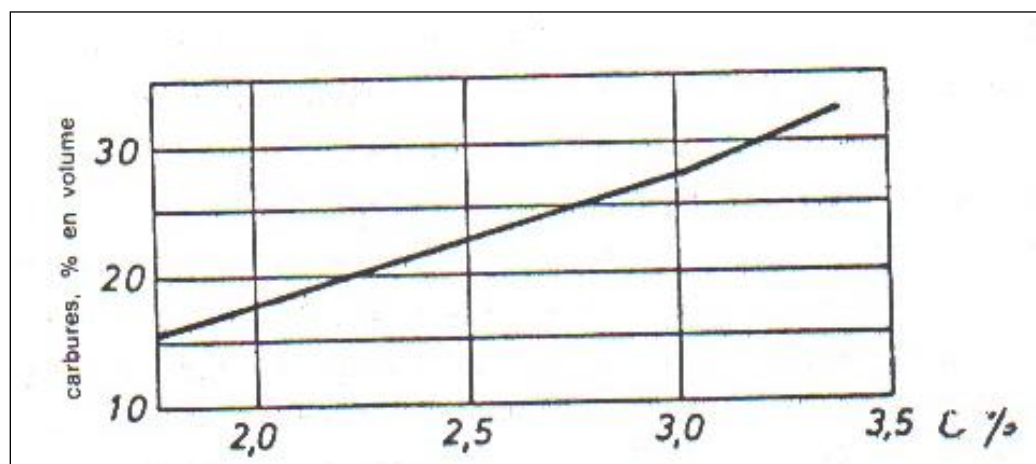


Figure 1.10: Courbe établie par A.KULMBURG, donnant le volume de carbure en fonction de la teneur en carbone pour un alliage à 12 % de chrome. [11]

1.13.2 Classes structurales des aciers dans le système Fe - C- Cr

Suivant la structure à l'état d'équilibre les aciers alliés peuvent former les catégories suivantes : [12]

1) hypoeutectoides avec une structure de ferrite alliés excédentaire ;

2) eutectoïdes ;

3) hypereutectoïdes contenant des carbures en excès (secondaires) précipités par l'austénite en refroidissement.

Les aciers alliés hypoeutectoïdes, eutectoïdes et hypereutectoïdes sont généralement réunis dans la classe commune des aciers perlitiques.

La structure des aciers lédéburitiques (carburés) se caractérise à l'état coulé par un eutectique du type lédéburite dans lequel se trouvent de gros carbures. Le forgeage donne à ces carbures la forme de globules isolés. La teneur en carbures de ces aciers s'élève jusqu'à 30 à 35%. D'après leur structure, les aciers lédéburitiques devraient être considérés comme des fontes blanches, mais leur taux de carbone relativement faible ($< 2\%$) les rend capables de subir une déformation plastique (forgeage) et de ce fait on les rapporte aux aciers.

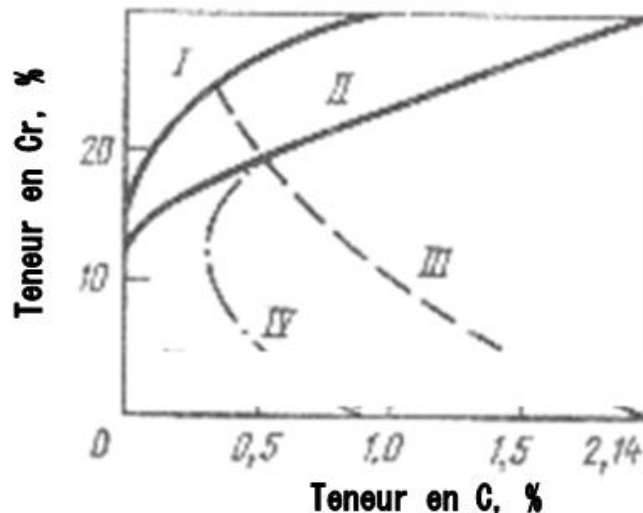


Figure 1.11: Classes structurales des aciers dans le système Fe-C-Cr (I- Acier ferritique ; II- Acier demi-ferritique ; III- Acier lédéburitique; IV- Acier hypereutectoïde ; V- Acier hypoeutectoïde [12])

Les éléments d'alliage déplacent à gauche ou à droite les points S et E du diagramme d'équilibre de Fe-C. C'est pourquoi la limite entre les aciers hypoeutectoïdes, hypereutectoïdes et lédéburitiques est déplacée dans le domaine d'autres teneurs en carbone que dans le système Fe-Fe₃C.

Ainsi, lorsqu'un acier titre 5 % Cr, la concentration du carbone dans l'eutectoïde (point S) baisse jusqu'à 0,5%, et la solubilité limite du carbone dans l'austénite (point E), jusqu'à 1,3%. Avec 10 % Cr, le point S correspond à 0,25 - 0,3%C, et le point E à 1%C.

Lorsque la teneur en carbone est basse et la quantité d'éléments d'alliage délimitant le domaine d'existence de l'austénite (Cr, W, Mo, V, Si, etc..) est importante, il se forme un acier qui se rapporte à la classe ferritique.

A toutes les températures la structure d'un tel acier se compose de ferrite allié et d'une certaine quantité de carbures.

Lorsque la teneur de l'acier en élément gammagène (Ni, Mn) est élevée, on peut obtenir à la température ordinaire une structure purement austénitique. Cette classe des aciers ne subissant pas de transformation allotropique est dite austénitique.

1.13.3 Usinabilité

Il faut tout d'abord une bonne usinabilité, surtout lorsqu'il s'agit de faire des outils en série. La plus part des éléments d'alliage utilisés, en particulier le chrome, le tungstène, le molybdène et le vanadium, qui sont avides de carbone, ont un effet néfaste sur l'usinabilité. Cet effet est influencé par la taille, la forme et la répartition des carbures dans la microstructure. Ces aciers sont en général plus faciles à usiner lorsqu'ils ont une structure recuite avec des carbures sphéroïdisés et bien répartis dans la matrice.

1.13.4 Réponse au traitement thermique

Cette propriété peut se définir par la possibilité d'obtenir après trempe et revenu un niveau de dureté donné à un endroit donné de l'outil en se fixant les paramètres suivants:

- Conditions d'austénitisation (température de chauffage et temps de maintien)
- Dimensions des pièces à traiter.
- Milieu de refroidissement.

1.13.5 Aptitude à la rectification

L'aptitude à la rectification des aciers indéformables varie dans de grandes proportions selon leur composition chimique, le type et le profil de meule utilisée. Cette caractéristique peut être chiffrée d'une manière globale par un indice de meulabilité qui représente, le rapport du volume de métal enlevé au volume d'abrasif utilisé.

1.13.6 Classification des aciers à outils

Dans le domaine de la mise en forme ou le découpage des métaux, le critère déterminant l'outil de qualité est le maintien de la dureté et la ténacité à la température atteinte dans sa partie active. Si cette température est relativement basse, inférieure ou égale à 150 °C, on aura affaire à des aciers de travail à froid ; en revanche, si elle est supérieure à 300 °C, on aura affaire à des aciers de travail à chaud ou à des aciers rapides.

La classification des aciers à outils entre le travail à froid et le travail à chaud se fait donc essentiellement au niveau de la dureté à chaud.

- Les aciers de travail à froid se caractérisent par une très grande dureté à la température ambiante, supérieure ou égale à 55 HRC et par une faible dureté à chaud.
- Les aciers de travail à chaud se distinguent par une dureté élevée à la température ambiante, et par une bonne dureté à chaud.

Chaque nuance des aciers à outils est désignée par un nombre de quatre chiffres, selon des principes de la norme NFA 35-590 [12]

Le premier chiffre correspond à la classe d'aciers :

- 1: Aciers non alliés pour travail à froid.
- 2: Aciers alliés pour travail à froid.
- 3: Aciers alliés pour travail à chaud
- 4: Aciers à coupe rapide.

Le second chiffre correspond à un caractère commun (Caractéristiques d'emploi)

- 1: Résistance à l'usure
- 2: Résistance à l'usure et l'indéformabilité
- 3: Résistance aux chocs mécaniques.
- 4: Résistance aux chocs thermiques
- 5: Résistance à l'usure aux températures élevées.
- 6: Résistance aux très hautes températures (aciers austénitiques)

Le troisième chiffre est lié à la présence de certains éléments d'alliage.

- 1: Aciers à base de manganèse.
- 2: Aciers à base de silicium.
- 3: Aciers à base de chrome.
- 4: Aciers à base de tungstène.
- 5: Aciers à base de molybdène.
- 6: Aciers à base de vanadium.
- 7: Aciers à base de nickel.

Le quatrième chiffre : le numéro d'ordre (permettant de différencier les nuances d'un même sous groupe).

1.13.6.1 Aciers alliés de travail à froid

En fonction des additions d'éléments d'alliage, dans le but de remédier aux insuffisances telles que la faible capacité de trempe, la trop grande fragilité, le manque de résistance à l'usure, on divise les aciers de la classe 2 en cinq groupes.

Groupe 21: aciers résistant à l'usure.

Groupe 22: aciers à très haute résistance à l'usure.

Groupe 23: aciers résistant aux chocs.

Groupe 27: aciers résistant aux chocs et à l'usure dans certain milieu corrosif.

Groupe 28: aciers pour forgeage à froid.

Ils sont caractérisés par des niveaux de dureté élevés à la température ambiante (entre 56 et 63 HRC), mais par une résistance à l'adoucissement faible ; ils ont des teneurs massiques en carbone élevées ($> 0.6\%$), mais des teneurs massiques en éléments fortement carburigènes tels que W, Mo, et V assez basses ($W \leq 2\%$; $Mo \leq 1\%$; $V \leq 0.5\%$). Cette catégorie regroupe les aciers dont les compositions chimiques s'étendent de faibles additions de Cr, Mn, Si, à des teneurs en chrome correspondant à celles des aciers très résistants à l'usure, de la famille aciers lédeburitiques.

1.13.7 Propriétés principales désirées

La nature des sollicitations auxquelles, ils sont soumis les aciers à outils, conduisent à mettre l'accent sur certaines propriétés et à leur apporter une attention plus particulière, c'est-à-dire leur attribuer plus grande valeur.

Les principales propriétés visées sont la dureté et la ténacité. [12]

- La plus part des outils doivent avoir une dureté la plus élevée possible, qui leur permet de résister à la déformation lors qu'ils travaillent par enfoncement ou par cisaillement du métal, ou par pénétration dans ce dernier pour enlever une partie sous forme de copeaux.

- A la dureté est souvent reliée une autre propriété qui est la résistance à l'usure. C'est en fait, la résistance à l'arrachement de particules du métal lors du frottement contre une autre surface.

L'usure n'est reliée qu'indirectement à la dureté, si, d'une manière générale, une dureté élevée est une condition de la résistance à l'usure, toute fois, des différences peut apparaître entre des métaux de même dureté.

Si nous comparons un acier à outil au carbone non allié et un acier à coupe rapide, qui, l'un et l'autre, peuvent être amenés à une dureté de 65 HRC, on remarque que le dernier a une résistance à l'usure beaucoup plus grande que le premier ; propriété conditionnée par la présence de carbures: Carbures de chrome, de molybdène, de tungstène, de vanadium.

- Une bonne ténacité pour résister aux effets de chocs ou de vibrations et pour éviter la rupture brutale prématurée ou les écaillages consécutifs à des propagations de fissures liées au cycle de contraintes mécaniques.

Il est à ajouter d'autres propriétés:

- Une propriété très particulière aux aciers à outils est la résistance aux chocs thermiques, c'est-à-dire aux changements de température brusques et répétés, c'est le cas de beaucoup d'outils qui s'échauffent en cours de travail (exemple : aciers pour moule, les outillages de forge et les cylindres de laminage).
- Une propriété à laquelle on doit, dans le cas des aciers à outils, attacher une importance certaine, est la capacité de trempe ou trempabilité (liée, pour une très grande part, à la composition de l'acier), pour que la structure soit homogène sur de très grandes épaisseurs après traitement thermique de trempe.

La stabilité de forme et de dimension, dureté, résistance à la déformation et à l'usure, absence de fragilité sont des propriétés parfois contradictoires entre lesquelles il faut trouver un compromis satisfaisant. L'acier doit conserver ses propriétés favorables malgré les altérations provoquées par les conditions d'emplois.

CHAPITRE **2**
METHODOLOGIE EXPERIMENTAL

2.1. Présentation des matériaux étudiés

a - Choix des aciers fortement alliés testés (D2).

L'acier de travail à froid **D2** est un acier très utilisé dans les applications industrielles nécessitant une bonne résistance à l'usure, ainsi qu'une bonne capacité de résistance à la chaleur. Il est principalement utilisé pour la fabrication d'outils et de matrices, notamment dans des environnements de travail à froid où la résistance aux chocs et à l'usure est importante.

2.1.1 Composition chimique

L'acier D2 était sous forme de rond de diamètre 20 mm et de méplat de 8 mm de large et 6 mm d'épaisseur. Le tableau 2.1 donne la composition chimique de l'acier outil D2 tiré de chez le fabricant. [1]

Tableau 2.1: Composition chimique d'un acier à outils D2 [1]

Eléments d'additions	C	Cr	Si	Mn	Mo	V	W
Min	1.4	11	0.10	0.20	0.70	0.20	0.012
Max	1.6	13	0.60	0.60	0.80	0.50	0.016

2.1.2 La microstructure

L'analyse microstructurale met en lumière l'évolution typique des phases de l'acier D2 à travers divers traitements thermiques

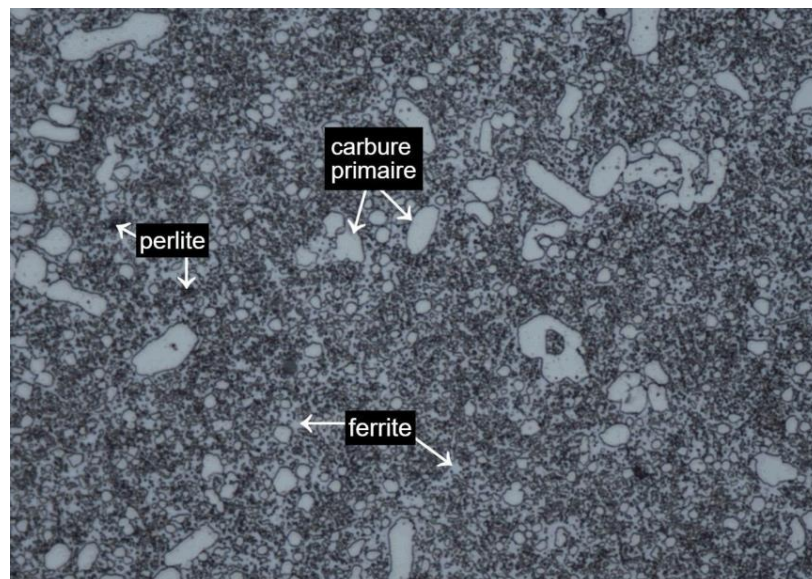


Figure 2.1 : La micrographie de D2 à l'état de recuit

2.1.3 La dureté

La dureté à l'état recuit de l'acier à outils D2 : 25 HRC

2.3 Préparation des échantillons

Pour la coupe des échantillons de l'acier D2, on utilise la tronçonneuse rapide à disque pour la coupe de tous les métaux. Tête et étau pivotants de 45° gauche à 45° droite. Arbre porte disque pivotant sur roulements à billes. Moteur triphasé de 5,5 kw pour disque de 300 mm de diamètre. La figure 2.1 montre une photo de la tronçonneuse utilisée. [2]



Figure 2.2: Tronçonneuse à disque.

L'échantillon destiné au traitement thermique avait des dimensions de 20 mm de diamètre et 10 mm de haut. Un exemple d'échantillon est montré à la figure 2.2.

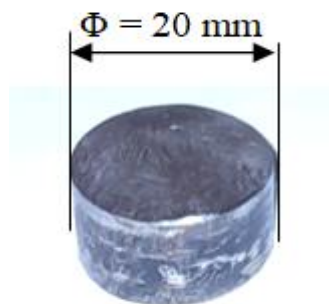


Figure 2.3: Echantillon destiné pour le traitement thermique.

2.4. Polissage

Pour la préparation métallographique des échantillons, nous avons utilisé une polisseuse à disque manuelle à un plateau tournant de diamètre 250 mm, offrant une combinaison de robustesse, de flexibilité et de contrôle avec des paramètres de polissage. La figure 2.3 montre une photo de la polisseuse. [3]



Figure 2.4: Polisseuse métallographique.

*** Spécification techniques :**

- Nombre de plateaux 1
- Diamètre du plateau 200 mm ou 250 mm.
- Vitesse de rotation : 20 à 700 RPM
- Sens de rotation : horaire et antihoraire.
- puissance du moteur 250 W.
- Fonction essorage : 700 RPM.



Le papier abrasif, est un papier à la surface duquel est fixé un matériau abrasif. Il est utilisé pour façonner ou polir la surface.

2.5. Attaque chimique

Après le polissage de finition l'échantillon subit une attaque chimique afin de révéler sa microstructure. Le réactif utilisé est le Nital à 3% qui consiste en 97 ml d'éthanol et 3 ml d'acide nitrique (HNO_3). L'attaque chimique dure environ 30 secondes, après quoi, l'échantillon est immergé dans l'eau courante ensuite séché à l'aide d'un séchoir. [4]

2.6 Observation microscopique

a. Microscope Zeiss Axiovert 40 MAT :

Le Zeiss Axiovert 40 MAT est un microscope métallographique à plateau inversé, conçu pour l'observation de surfaces métalliques, céramiques, revêtements et autres matériaux

solides opaques. Il est particulièrement utile pour l'analyse microstructurale (grains, phases, défauts) et l'inspection de surfaces traitées (polies, soudées, revenues).

La figure 2.6 montre le microscope optique.



Figure 2.5: Microscope optique.

Caractéristiques principales :

Type de microscope : Métallographique inversé, pour échantillons opaques.

Applications : Contrôle qualité, Recherche en science des matériaux, Analyse de microstructure

Système optique : Infinity Color Corrected System (ICS) de Zeiss

➤ Offre une excellente qualité d'image.

Objectifs : Longue distance de travail (LD) : 5×, 10×, 20×, 50×

➤ Plan-achromatiques ou apochromatiques (bonne correction des aberrations)

Éclairage : Lumière réfléchie (type Köhler), Source halogène 12V/50W (intensité réglable)

Filtres pour contraste amélioré (polarisation, filtre vert...)

Observation : Tête binoculaire ou triloculaire, Port caméra pour imagerie numérique

Platine : Déplacement XY précis,

Capacité à accueillir de grands échantillons

Contrastes disponibles : Contraste en lumière réfléchie, Polarisation, Contraste interférentiel (optionnel). [5]

b. La Microscope Electronique a Balayage (MEB)

Le MEB est une technique permettant de visualiser la surface de structures massives, l'échantillon apparaissant en volume. Un microscope électronique à balayage utilise un faisceau d'électrons très fin qui balaie, point par point, la surface de l'échantillon à observer.

Le principe du balayage consiste à parcourir la surface de l'échantillon par lignes successives et à transmettre le signal recueilli via un détecteur à un écran cathodique dont le balayage est exactement synchronisé avec celui du faisceau incident [6].



Figure 2.6: Microscope électronique à balayage

2.7. Fours de traitement thermique

a. Four de trempe :

Pour le traitement thermique sont effectués dans un four à moufle de marque Nabertherm.

L'isolation robuste en briques réfractaires légères permet d'atteindre une température de travail de 1300 °C. Des segments programmables facilitent le contrôle de chauffe des échantillons. La figure 2.6 montre une photo du four à moufle. Il a les caractéristiques suivantes :

- T Max 1300 °C
- Chauffage des deux cotés
- Les éléments chauffants sur tube porteurs assurent un rayonnement libre de la chaleur et une grande durée de vie.
- Isolation multicouches en briques réfractaires légères robuste dans la chambre du four
- Enveloppe à double paroi en tôle inox structurée avec système de refroidissement supplémentaire pour limiter la température extérieure de la carcasse
- Au choix avec porte à battant(L) utilisable comme support ou sans supplément avec porte guillotine(LT), la partie chaude étant la plus éloignée de l'opérateur
- Ouverture réglable de l'arrivée d'air dans la porte
- Cheminée d'évacuation de l'air dans la paroi arrière du four
- Programmeur avec commande tactile B510 (5 programmes avec 4 segments chacun)

- Chauffage silencieux fonctionnant avec des relais statique
- Application définie dans la limite des instructions de fonctionnement.
- Logiciel NTLog Basic pour programmeur Nabetherm : enregistrement des données via Clé USB. [7]



Figure 2.7: Four à moufle Nabertherm

b. Four de revenu :

Nous avons utilisé un four Carbolite TM à chambre de laboratoire à usage général monté sur paillasse avec une température de fonctionnement maximale allant jusqu'à 1100°C. La figure 2.8 montre une photo du four de revenu. Les caractéristiques principales du four sont énumérées ci-dessous :

- T Max 1100 °C
- Volume de chambre de 5, 13 23, 36 ou 65 L
- Régulateur Carbolite-Gero 301 avec montée simple au point de consigne et minuterie
- Porte de fermeture souple sur les modèles 5, 13 21et 23 L
- Porte à ouverture parallèle maintient la surface chauffée à distance de l'utilisateur
- Fonction de démarrage différé / minuterie de série
- Portoir, entrée et intérieur du four en oxyde d'aluminium résistant
- Isolation à masse thermique faible de grande efficacité énergétique
- Éléments bobinés rayonnants libres pour une uniformité optimale
- Accès facile aux éléments, les commandes simplifient la maintenance et l'entretien. [8]



Figure 2.8: Four de revenu

2.8. Essais mécaniques : dureté (Rockwell)

Pour mesurer la dureté selon la méthode Rockwell, un appareil spécial, est un duromètre de marque BUEHLER, utilisé pour mesurer la dureté des matériaux, notamment des métaux. Elle fonctionne ici selon l'échelle Rockwell (symbolisée par "R", "S", "HR", etc. sur l'écran). La figure 2.8 montre une photo de l'appareil.

Il se compose de trois parties principales : une enclume, un cône en diamant et un cadran de mesure. Un échantillon est placé sur l'enclume et une charge mineure est appliquée. Le cadran de mesure est mis à zéro puis une charge importante est appliquée. La profondeur de pénétration à partir de la référence zéro est mesurée à partir d'un cadran. Un cône de diamant avec un angle de 120° est imprimé sur la surface en appliquant une force de 100 N. C'est le point de départ de la mesure. Une force supplémentaire de 1400 N à 1500 N est appliquée et laissée pendant un « temps de séjour » suffisant pour que l'indentation s'arrête. [9]



Figure 2.9: Duromètre Rockwell.

CHAPITRE
RESULTATS & DISCUSSION

3.1 Introduction

Ces dernières années, les aciers à outils pour travail à froid ont suscité un intérêt considérable pour des applications critiques dans des secteurs industriels tels que les matrices de découpage et de formage, les calibres et les pinces de serrage. Les applications typiques, en particulier pour l'AISI D2, sont les suivantes : matrices, matrices de découpage, matrices de frappe, poinçons, lames de cisaillement, matrices de formage à tête cruciforme, matrices de formage en résine thermodurcissable, matrices de formage à froid, rouleaux filetés, découpe fine, rouleaux de profilage et outils de presse, moules à briques, burins, outils pneumatiques, etc. [6–9]. La demande mondiale d'aciers devrait passer d'environ 1 700 millions de tonnes à près de 1 750 millions de tonnes, et sa croissance est continue. [1]

L'acier à outils pour travail à froid se compose de trois classes d'aciers : les aciers AISI de type O, A et D, respectivement durcis à l'huile, durcis à l'air et à haute teneur en carbone-chrome. Il est classé comme acier à haute teneur en carbone, contenant entre 0,60 et 1,00 % de carbone selon l'American Iron and Steel Institutes (AISI). L'AISI D2 présente une teneur élevée en carbone (1,5 à 2,35 % en poids de carbone) et en chrome (environ 12 % en poids de chrome), ce qui lui confère une dureté et une résistance à l'usure élevées (environ 12 % en poids de chrome), notamment dans les environnements de travail à froid. Dans les sections suivantes nous allons établir un protocole d'expérimentation pour apprécier la réponse aux traitements thermiques de l'acier D2.

3.2 L'acier D2 à l'état de réception

L'acier à outils D2 est un choix populaire pour diverses applications industrielles, y compris les outils de coupe, les moules et les matrices. Son nom, représenté par le « D » de D2, indique qu'il s'agit d'un acier outil. Cet acier polyvalent est connu sous différents noms, tels que SKD11 et X153CrMoV12, en fonction des normes régionales et des fabricants.

L'acier à outils D2 est souvent appelé « acier semi-inox » en raison de sa teneur en chrome de 12 %. Bien qu'il offre un certain niveau de résistance à la corrosion, il n'offre pas la même protection que les aciers entièrement inoxydables tels que l'acier inoxydable 416 ou l'acier inoxydable 410, qui contiennent des niveaux plus élevés de chrome. Toutefois, l'acier à outils D2 surpasse d'autres aciers durs comme l'acier à outils O1 en termes de résistance à la corrosion. La teneur élevée en carbone de l'acier à outils D2, généralement de l'ordre de 1,5 %, contribue à son excellente résistance à l'usure et à sa dureté. Il convient donc parfaitement aux applications nécessitant une résistance à l'usure abrasive, telles que les outils de coupe, de cisaillement et de formage. La teneur élevée en chrome améliore encore sa résistance à l'usure et lui confère une

bonne stabilité dimensionnelle, ce qui permet d'obtenir des performances précises et fiables. Outre sa résistance à l'usure, l'acier à outils D2 présente une ténacité élevée, ce qui lui permet de résister aux impacts et aux chocs. Cette combinaison de dureté et de ténacité le rend adapté aux applications exigeantes où la résistance et la durabilité sont essentielles.

L'acier outil D2 est livré sous forme de barres rondes de diamètres 20 mm et de méplat de 80 mm de large et 6 mm d'épaisseur. Les essais préliminaires au duromètre Rockwell nous ont confirmé que l'acier D2 est réceptionné à l'état recuit. Sa dureté initiale était inférieure à 20 HRC.

Cette première constatation nous affranchit du recuit d'adoucissement puisque nous pouvons le couper et polir les faces des échantillons sans effort.

3.3 Protocole de traitement thermique

L'acier à outils D2 est un acier fortement allié et à haute teneur en carbone, conçu pour offrir une résistance et une ténacité accrues. Cet acier a une teneur élevée en chrome (11 à 13 %) et des quantités relativement importantes de molybdène (0,7 à 1,2 %), de vanadium (1,1 %), de cobalt (1 %) et d'autres éléments. Ce mélange complexe rend le traitement thermique approprié de l'AISI D2 plus complexe que le traitement thermique d'autres aciers simples et d'outils.

Étape 1

Le préchauffer l'acier se fait en augmentant lentement la température à 650 degrés Celsius. La montée en température doit se faire en fonction de la masse de l'acier (les grandes pièces d'acier nécessiteront une période de préchauffage plus longue que les petites.) Cela permet de préparer l'acier à un chauffage ultérieur et d'éviter la formation de tensions inutiles dans l'acier.

Étape 2

Il faut augmenter la température à 850 degrés Celsius avec une vitesse de chauffe de 10 °C/min. Une fois la température de 850 °C atteinte, nous maintenons cette température pendant 15 minutes. Le but est de soulager les contraintes internes de l'acier.

Étape 3

L'acier est chauffé à une température comprise à 1020 °C et maintenu à cette température pendant une durée de 40 minutes afin de garantir un chauffage uniforme. Il est ensuite rapidement trempé dans un milieu approprié tel que l'huile, l'eau ou l'air. Ce refroidissement rapide transforme la microstructure de l'acier, ce qui lui confère une grande. Il faut signaler cependant, qu'à cause des grandes disparités d'informations retrouvées dans la littérature au sujet de la température d'austénitisation allant de 950 °C à 1220 °C, nous avons débuté nos expériences, avant d'assouvir notre curiosité à 950 °C. Ensuite, pour toutes les expériences

restantes, la température d'austénitisation a été fixée à 1020 °C. En général, un temps de trempage compris entre 30 minutes et 1 heure est suffisant. Toutefois, les très grandes sections d'acier, ou celles qui pèsent plus de 50 livres, nécessitent des temps de trempage plus longs - parfois plus de 12 heures - et sont mieux adaptées aux processus de traitement thermique industriel. La figure 3.1 donne les schémas complets des traitements thermiques que nous avons expérimenté à une température d'austénitisation de 950 °C pour un temps de maintien de 40min. ces températures de mise en solution à 950 °C ont été suggérées par [1,2p].

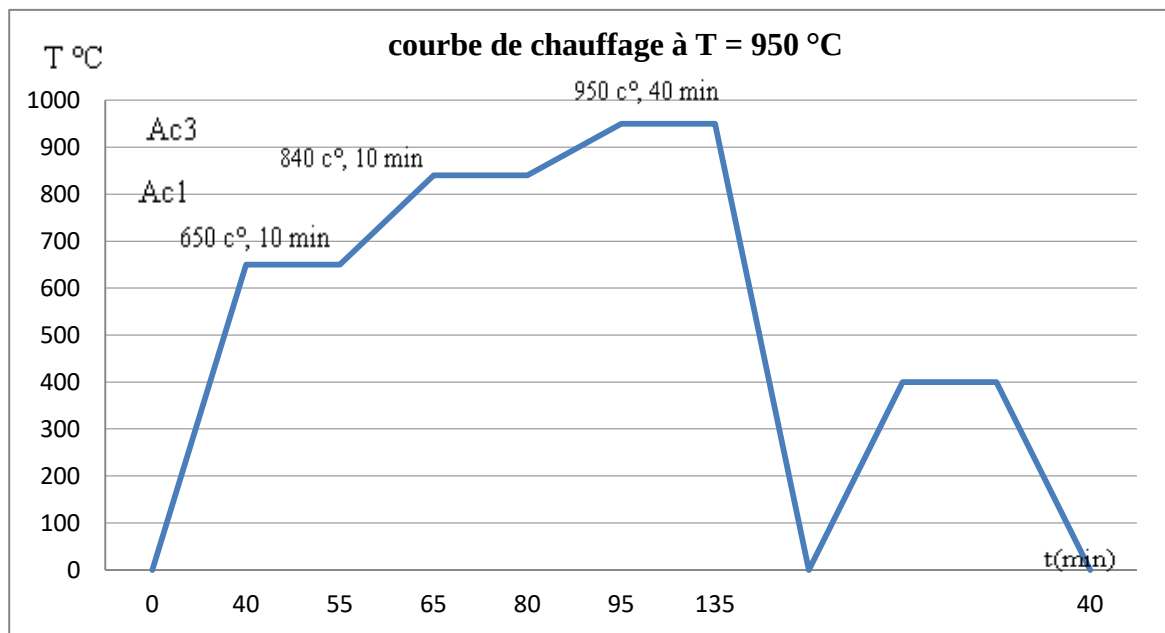


Figure 3.1: Diagramme de traitement thermique du D2 à une $T=950$ °C, 40 min.

L'organigramme des traitements thermiques réalisés à une température d'austénisation de 950 °C est donné à la figure 3.2

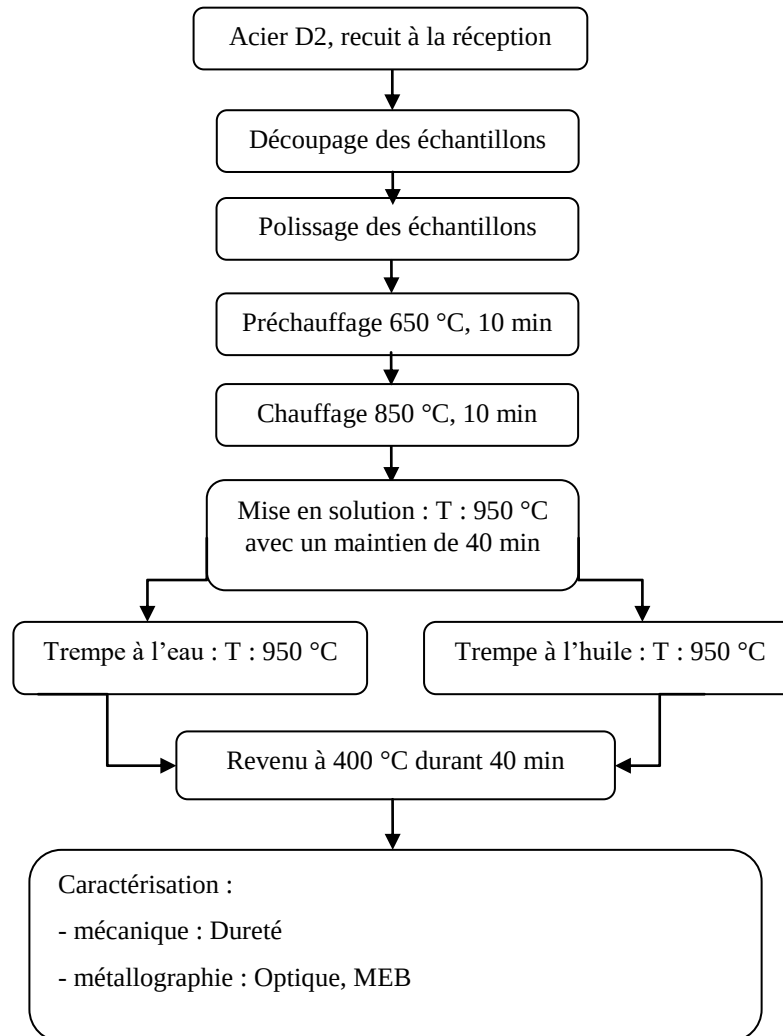


Figure 3.2: Organigramme des traitements thermiques réalisés à T= 950 °C, 40 minutes.

La première température d'austénitisation a été faite à 950 °C dans le but de voir quelle serait l'effet d'une austénisation insuffisante sur un acier outil sur ses propriétés mécaniques. Les résultats de ces premières expériences sont résumés au tableau 3.1. Les duretés sont sensiblement constantes sur la section des échantillons quelque soit le milieu de trempe. Il y a une légère amélioration de la dureté pour une trempe à l'eau. Cependant, les valeurs de dureté sont relativement basses par rapport à ce qui est prévu dans la littérature. Elles doivent être $\geq$ à 60 HRC.

Tableau 3.1: Duretés des échantillons trempés de 950 °C et revenu à 400°C.

Echantillon	T (°C)	Temps de maintien (min)	Milieu de trempe	T (°C) de 1 ^{ère} revenu	1 ^{ère} revenu (min)	Dureté HRC	
O1	950	40	Huile	400	40	 55.42	54.9 55.5 55.8 54.9 56
W1	950	40	Eau	400	40	 55.90	55.3 55.9 56.1 56.2 56

Les expériences à une température d'austénisation de 950 °C ont été immédiatement abandonnées après ces deux tentatives préliminaires. Ces températures sont mieux indiquées pour les aciers outils sans le V ou Mo dans leur composition.

La figure 3.3 montre la photo de la microstructure des échantillons mis en solution à 950 °C pendant 40 minutes trempés dans l'huile puis revenu à 400 °C durant 40 minutes. Dans cette microstructure, nous distinguons les carbures primaires et les carbures secondaires. Lorsque le pourcentage de chrome est très élevé dans l'acier, il y a toujours des carbures qui sont présents quelque soit la température d'austénisation de l'acier D2 comme le montre le diagramme de phase Fe-C pour un acier outil D2 calculé à partir du logiciel ThermoCalc [3p] Nous remarquons que les carbures primaires sont reconnaissables par leur taille plus importante relativement aux carbures secondaires. Notez que lorsque le pourcentage de chrome est très élevé dans cet acier, il y a toujours des carbures qui sont présents quelque soit la température d'austénisation de l'acier car la solubilité du carbone est dans l'austénite comme la figure 3.4.

La dureté moyenne de l'acier outil D2 trempé à 950 °C et revenu à 400 °C est relativement identique dans les deux milieux de trempe. Cette valeur st très en dessous des normes pour un tel acier.

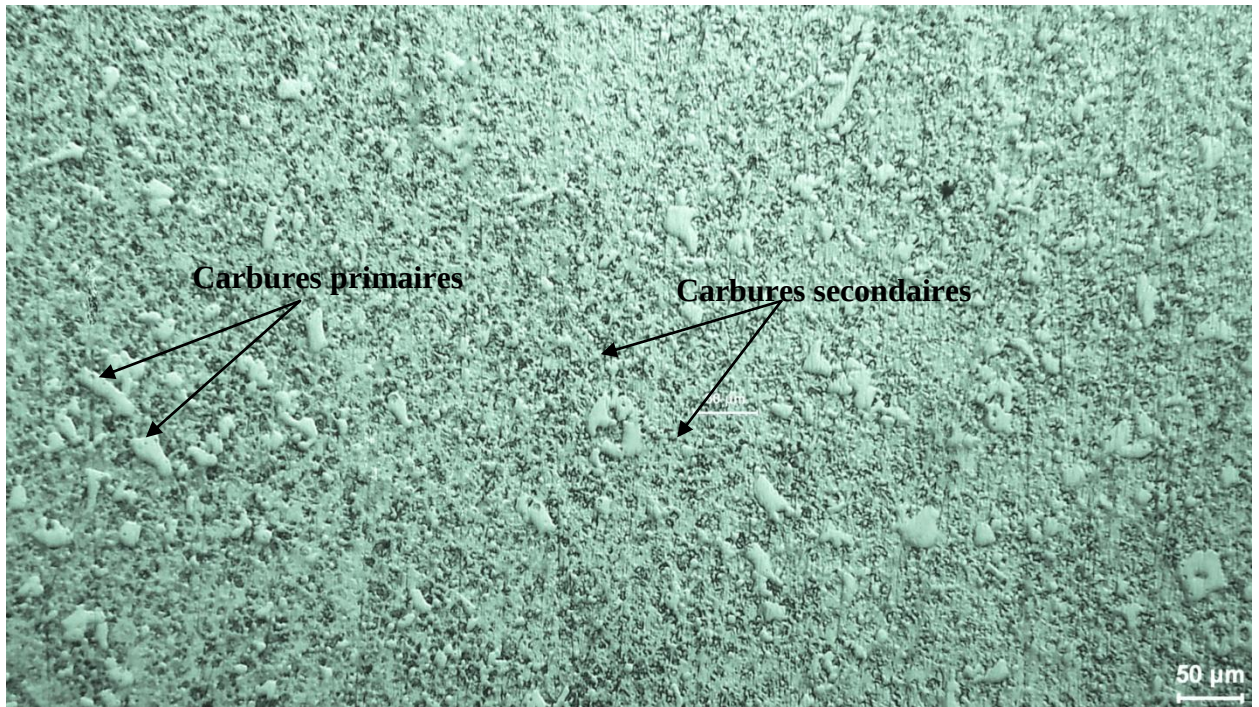


Figure 3.3: Coupe métallographique des échantillons trempés de 950 °C, 40min et trempé à l'huile puis revenu à 400 °C, 40 min.

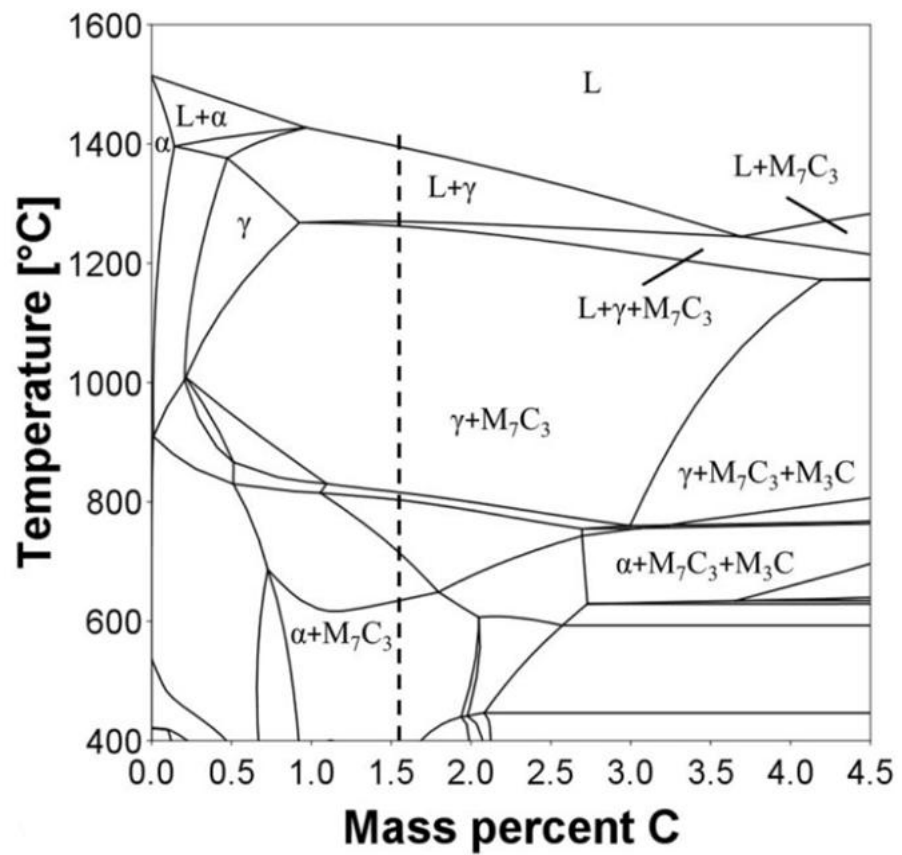
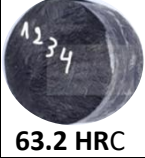
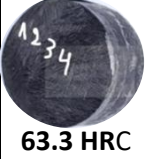


Figure 3.4: Diagramme de phase Fe-C d'un acier Outil D2 [3p]

A une température d'austénitisation de 1020 °C, nous avons la présence de carbures primaires de type M_7C_3 .

Pour l'acier D2, il est recommandé de le chauffer entre 1000 °C à 1220 °C. [2, 3]. C'est pourquoi, ces expériences ont été suivies par des traitements thermiques réalisés à des températures de mise en solution de 1020 °C durant 40 minutes mais sans aucun revenu. Les échantillons sont trempés dans l'air, l'huile et l'eau. Le cycle thermique des ces traitements thermiques est montré à la figure 3.5. Les résultats sont regroupés au tableau 3.2. Nous savons que l'augmentation la température d'austénisation améliore la dissolution des carbures dans l'austénite et par conséquent l'enrichir en carbone.

Tableau 3.2: Duretés des échantillons trempés de 1020 °C sans revenu dans différents milieux de tremp.

Echantillon	T (°C)	Temps de maintien (min)	Milieu de tremp	sans revenu	sans revenu	Dureté HRC	
A1	1020	40	Air	-	-		58.4 59.9 60.3 57.4
W3	1020	40	Eau				64.2 63.9 62.5 62.2
O3	1020	40	Huile				63.5 63.4 63.2 63

La figure 3.2 donne les schémas complets des traitements thermiques que nous avons expérimentés à une température d'austénisation de 1020 °C sans revenu. Nous avons éliminé pour cette nouvelle température d'austénisation le revenu pour montrer son importance dans le traitement thermique des aciers outils.

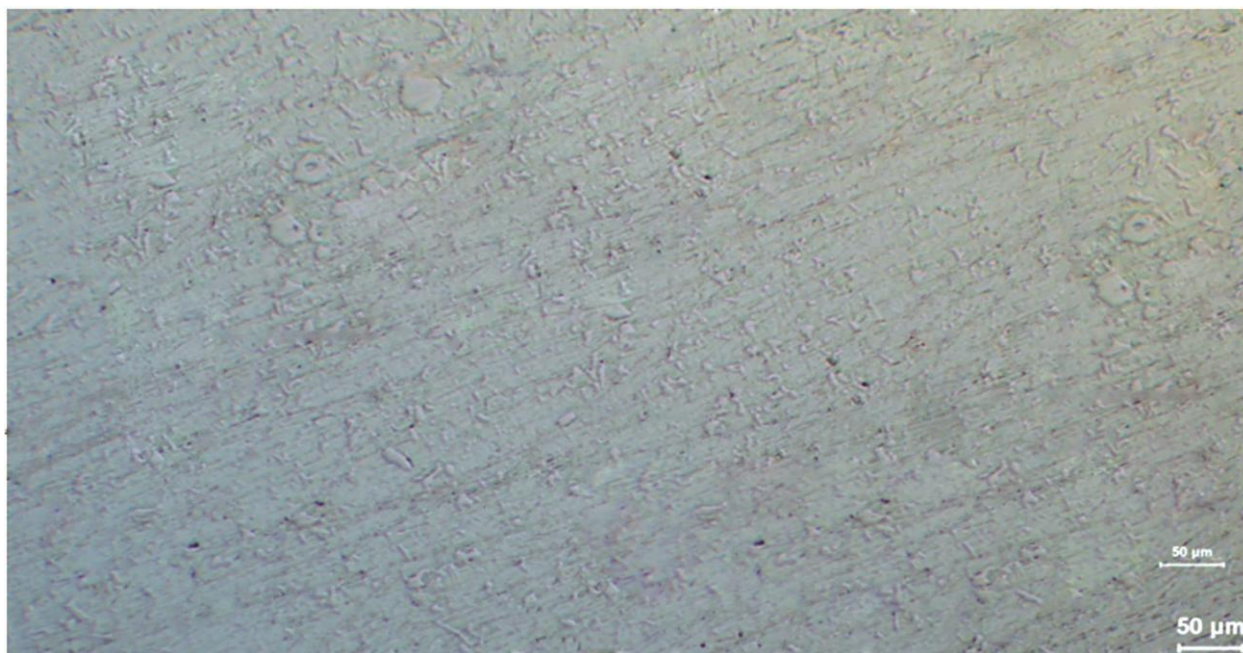


Figure 3.5 : Coupe métallographique des échantillons trempés de 950 °C, 40min et trempé à l'huile puis revenu à 400 °C, 40 min.

Dans la prochaine série de traitements thermiques, nous allons chauffer les échantillons à une température d'austénitisation de 1020 °C durant 40 minutes et procéderons à des trempes à l'eau et à l'huile qui seront suivies d'un seul revenu à respectivement 150 °C ; 250 °C et 500 °C. Le schéma des traitements thermiques est donné à la figure 3.7.

Effet, l'un des problèmes de la trempe est que toute l'austénite ne se transforme pas immédiatement en martensite, ce qui laisse une certaine quantité d'austénite retenue lors de la trempe. Les aciers à outils pour travail à froid sont hautement trempables, supprimant efficacement la formation de perlite et limitant la formation de bainite dans les sections épaisses à refroidissement lent. Cependant, la composition chimique riche en carbone et en chrome de ces aciers abaisse les points M_s et M_f et empêche la transformation complète de l'austénite en martensite après la trempe [5]. La figure 3.8 montre le volume de la fraction d'austénite ou martensite résiduelle en fonction de la température de mise en solution. Elle indique que plus la température de mise en solution est élevée plus nous obtiendrons une fraction de martensite résiduelle élevée.

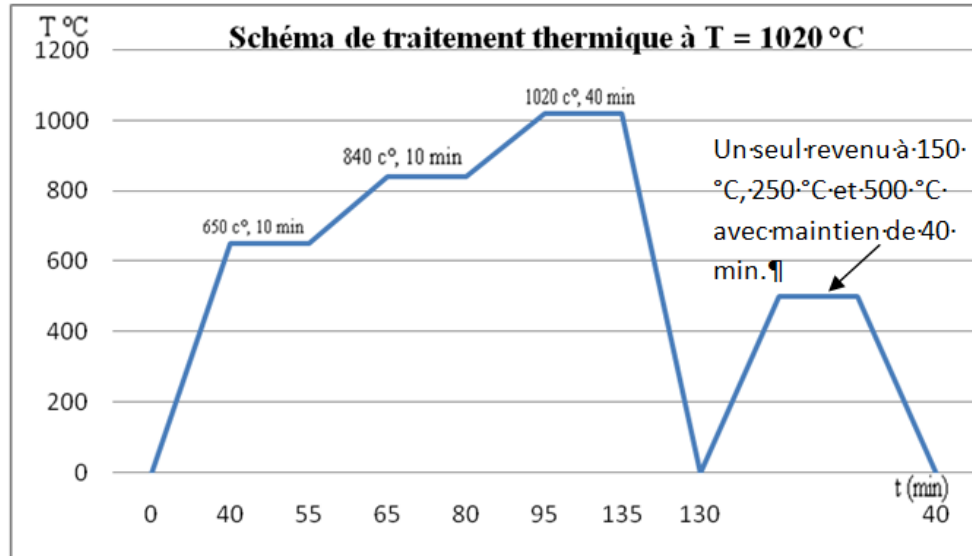


Figure 3.6: Schéma de traitement thermique d'une austénitisation à 1020 °C avec un seul revenu à respectivement 150 °C, 250 °C et 500 °C.

Nous effectuons un revenu après la trempe pour réduire la fragilité, mais au bout d'un certain temps, l'austénite non convertie se transforme en martensite. Cela se produit après le premier cycle de trempe, de sorte qu'il reste de la martensite non trempée, qui est fragile. Le revenu peut être défini comme un traitement permettant d'obtenir, dans les aciers trempés, une diminution de la dureté et une augmentation de la ductilité et de la ténacité. Une austénitisation excessive entraîne une dissolution excessive des carbures et leur précipitation ultérieure aux joints de grains d'austénite, ce qui diminue la stabilité mécanique des pièces traitées [13].

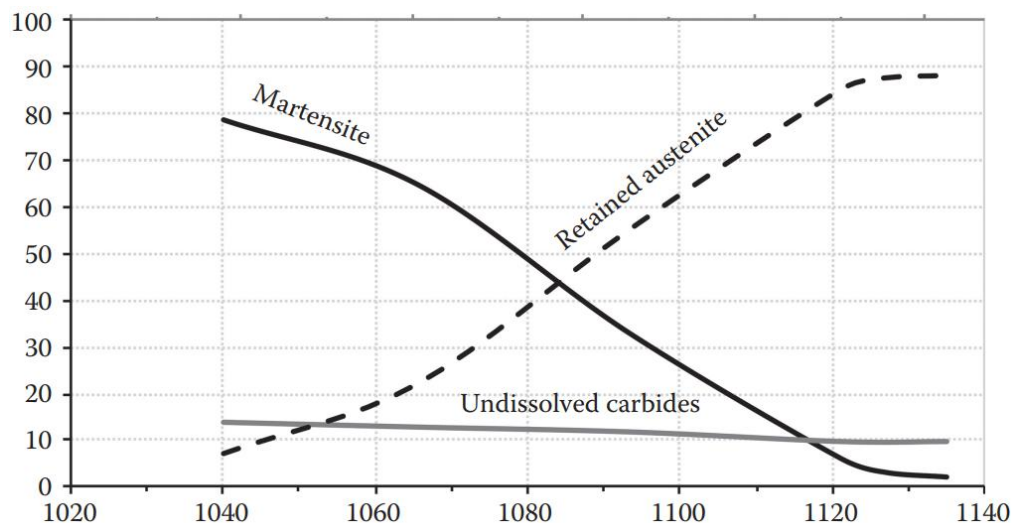


Figure 3.7 : Changement dans la fraction du volume des micro-constituants après trempe de l'acier D2 à différentes températures d'austénitisation. [12]

A la température de 250 °C, l'expérience réalisée à 1020 °C pour un temps de maintien de 40 minutes suivi d'un revenu à l'eau, a été écarté car le bac en plastique a été troué et le résultat de l'expérience a été rejeté. Les résultats du tableau 3.3 sont mieux en valeur avec la figure 3.9.

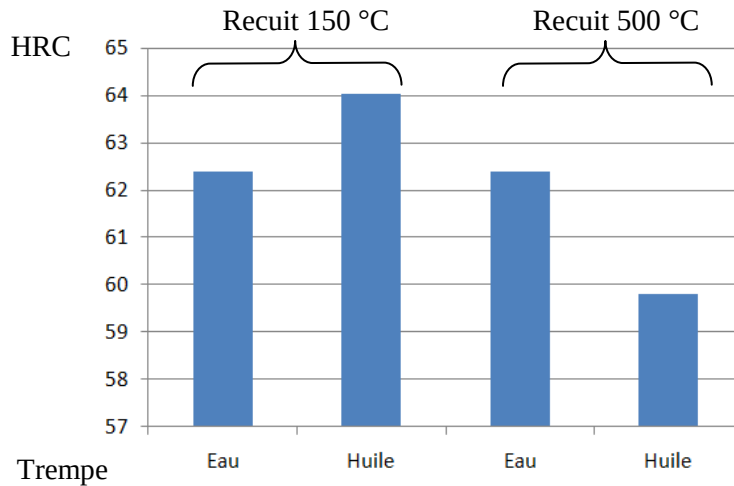


Figure 3.8: Histogramme des duretés moyennes du tableau 3.3.

D'après la figure 3.9, il est évident qu'un revenu à 150 °C est meilleur en valeurs de dureté que ceux obtenues à partir d'un revenu à 500 °C. Les figures 3.10 et 3.11 peuvent l'expliquer.

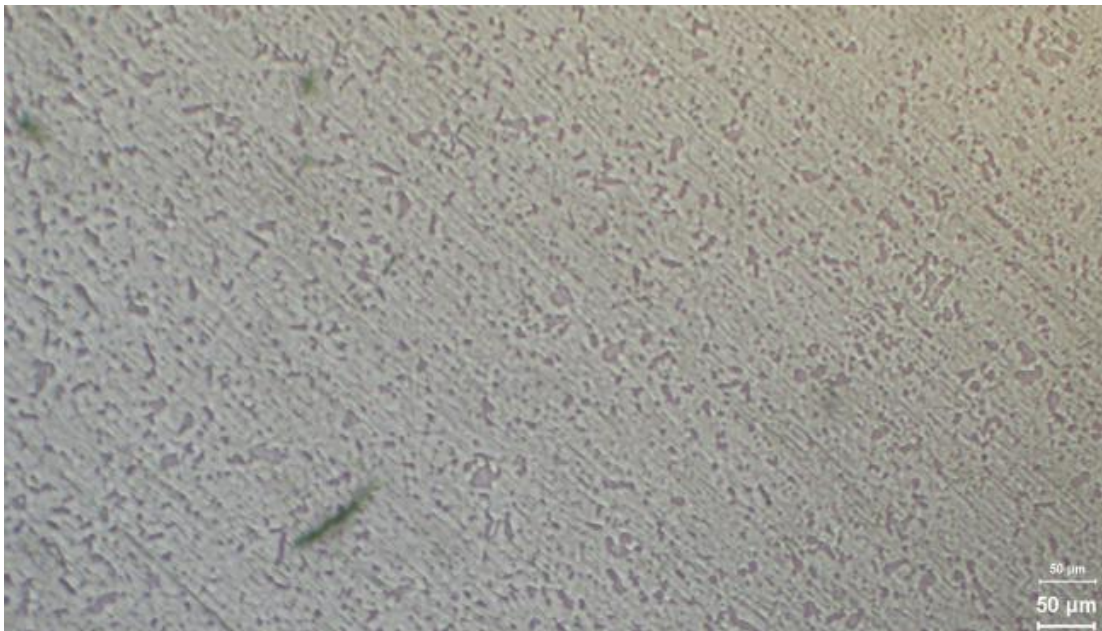


Figure 3.9: Microstructure d'un échantillon traité de 1020 °C, trempé à l'huile, revenu 150 C



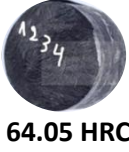
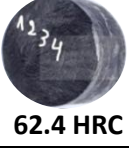
Figure 3.10: Microstructure d'un échantillon traité de 1020 °C, trempé à l'huile, revenu 500C

Nous remarquons que les carbures primaires et secondaires sont très fins dans le revenu à 150 °C alors que qu'ils sont très grossiers dans le revenu effectué à 500 °C.

Une série d'expérience a concerné les traitements thermiques réalisés à des températures de mise en solution de 1020 °C pour un temps de maintien de 40 minutes suivi d'un seul revenu réalisé à différentes températures : 150 °C, 250 °C et 500 °C. Dans notre cas, l'application finale de ces traitements concernait la fabrication d'un couteau de boucherie. Le tableau 3.3 regroupe les résultats de duretés obtenus de ces expériences.

.

Tableau 3.3 : Duretés des échantillons trempés de 1020 °C et pour un seul revenu à 150 °C, 250 °C et 500 °C

Echantillon	T (°C)	Temps de maintien (min)	Milieu de trempe	T (°C) de revenu	Temps de 1 ^{ère} revenu (min)	Dureté HRC	
O2	1020	40	Huile	150	40		62.6 62.3 62.5 62.2
W2	1020	40	Eau	150	40		63.9 64.1 64.1 64.1
O4	1020	40	Huile	250	40		60.0 60.2 59.6 59.5
O5	1020	40	Huile	500	40		55.3 55.9 54.5 54.5
W4	1020	40	Eau	500	40		52.7 54.1 54.1 54.0

La figure 3.3 donne les schémas complets des traitements thermiques que nous avons expérimentés à une température d'austénitisation de 1020 °C pour un temps de maintien de 40min.

A la température de 250 °C, l'expérience réalisée à 1020 °C pour un temps de maintien de 40 minutes suivi d'un revenu à l'eau a été écarté car le bac en plastique a été troué et le résultat de l'expérience a été rejeté.

De ces résultats, nous retenons que la mise en solution à 1020 °C avec un maintien de 40 minutes suivi d'une trempe à l'huile donne les meilleures valeurs de dureté pour l'acier D2.

Un deuxième cycle de trempe permet de s'assurer de la trempe de cette martensite nouvellement convertie. Le principal processus qui a lieu pendant le revenu de l'acier est la décomposition de la martensite avec précipitation de carbures [6]. Une densité accrue de dislocations [7] due à une déformation supplémentaire pendant le réarrangement martensitique du réseau rend la structure de la martensite similaire à celle d'un métal durci par déformation [8].

Il est important de considérer tout d'abord que la martensite est une structure métastable, ce qui signifie qu'elle n'est pas la phase ayant l'énergie libre la plus basse, et qu'elle a donc tendance à se convertir en une nouvelle structure si le temps et la température sont suffisants. Ainsi, si un acier à outils non trempé est soumis à des températures plus élevées pendant des périodes allant de quelques minutes à quelques heures, le carbone s'éloignera de la martensite et formera des carbures. La martensite passe alors progressivement de la structure tétragonale à la structure cubique, c'est-à-dire qu'elle se transforme en ferrite. D'une manière générale, la diffusion du carbone pendant le revenu vise à convertir la structure de la martensite en carbures et en ferrite, ce qui constitue la structure d'équilibre dans les aciers à outils.

La figure 3.12 donne les schémas complets des traitements thermiques que nous avons expérimenté à une température d'austénitisation de 1020 °C pour un temps de maintien de 40min suivi d'un double revenu à 150 °C durant 40 minutes. Les échantillons une fois sorti du four de revenu sont laissés refroidir à l'air libre.

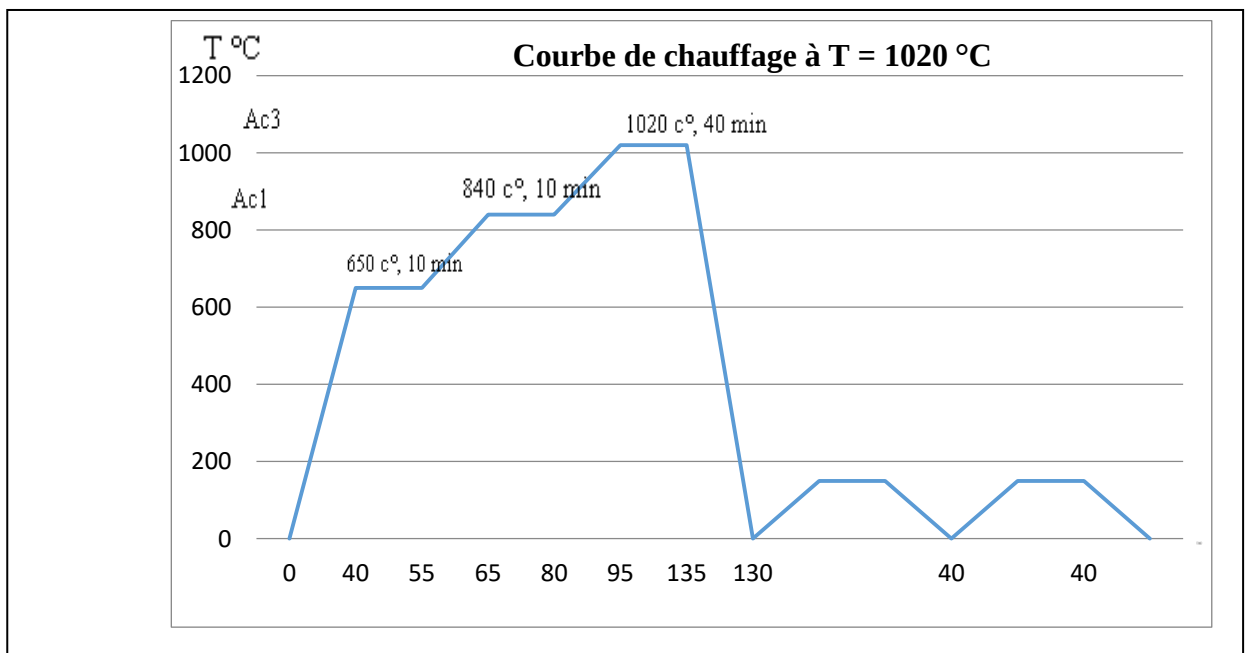


Figure 3.11 : Schéma de traitement thermique d'une austénitisation à 1020 °C avec double revenu à respectivement 150 °C durant 40 minutes.

Les résultats des duretés des échantillons après trempé et revenus sont donnés au tableau 3.4.

Echantillon	T (°C)	Temps de maintien (min)	Milieu de trempe	T (°C) de 2 ^{ème} revenu	Temps de 2 ^{ème} revenu (min)	Dureté HRC
O1	1020	40	Huile	150	40	 61.2 62.9 63.3 63.1 62.6 HRC
O2	1020	40	Huile	500	40	 58.7 58.8 58.5 58.4 58.6 HRC

Dans le tableau 3.4, les échantillons sont mis en solution à 1020 °C et maintenu pendant 40 minutes ensuite ils subissent deux revenus de suite à 150 °C durant 40 minutes. Des échantillons ont subi le même traitement thermique mais revenu à 500 °C pour fin de comparaison. La figure 3.13 montre une microstructure d'un échantillon poli et attaqué et qui a subi une mise en solution à 1020 °C et un double revenu à 150 °C durant 40 minutes.



Figure 3.12: Microstructure d'un échantillon trempé de 1020 °C + 2 revenus à 150 °C.

Nous remarquons que les carbures primaires n'ont pas un grossissement excessif et que les carbures secondaire sont très fin. Il y a une très bonne répartition de carbures dans toute la matrice ce qui devrait à l'acier outil une bonne stabilité et des valeurs de dureté optimales.

Le résultat obtenu de 1 ère revenue à 150 °C d'un acier D2 de forme plat est appliqué pour usiner un couteau de boucherie.



CONCLUSION :

Le but de ce travail est de faire subir une série de traitement thermique divers mais pas nécessairement recommandés par le fabricant afin de connaître les réponses à ces traitements d'un acier dénommé D2. Ces différents traitements thermiques nous ont permis d'identifier les différentes microstructures et duretés qui y seront liées. Ils nous permettront à terme de d'anticiper sur les manipulations faites par les clients sur les aciers D2 et aussi préparer une réponse adéquate à leur donner quant à un éventuel conseil ou réclamation sur l'acier outil acheté. Les principales conclusions que l'on peut tirer de ce travail sont:

- Une température d'austénitisation insuffisante entraîne une baisse de dureté générale dans les aciers K110 après trempe et après revenu.
- Il faut aussi noté qu'une mise en solution insuffisante provoque une baisse de dissolution des carbures secondaires. Ceci a pour conséquence de réduire le pourcentage de carbone dissous dans l'austénite qui entraîne forcément une baisse de la dureté de la martensite lors de la trempe.
- la pénétration de trempe, qui dépend essentiellement de la teneur en éléments d'alliage contenus dans l'acier et de la grosseur du grain austénitique. Plus le grain austénitique est gros moins il y a de germes pour former la perlite. En présence d'éléments d'addition, la formation de carbures piège une grande partie du carbone nécessaire pour la dureté de la martensite. Il faut donc chauffer le matériau a une température de mise en solution suffisante pour dissoudre les carbures formés et de libérer au carbone pour qu'il diffuser dans l'austénite.
- L'austénitisation de l'acier outil D2 à 1020 °C suivi d'un double revenu à 150 °C donne les meilleurs résultats pour l'application des couteaux de boucherie. La dureté atteinte est en moyenne égale à 62.6 HRC ce qui un résultat remarquable pour ce type d'application.
- Enfin, nous recommandons les fournisseurs de ce type d'acier de veiller à informer le client dans quel état métallurgique est réceptionné l'acier D2. Si le client veut le façonner, il doit le faire à l'état recuit. Les traitements thermiques se feront alors ultérieurement.

REFERENCES CHP1

- [1] George Krauss- Steels : Processing, structure, and Performance
- [2] Tylecote, R.F., A history of Metallurgy, 2nd ed, Maney Publishing, 1992.
- [3] the Robert Mushet story is also summarized in historical metallurgy reviews From the Iron and Steel Institute.
- [4] ENSAM-API Métallurgie/ Pr. A. AKHIATE .Maroc
- [5] https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_transformations_en_refroidissement_continu
- [6] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/DiagrammeTTT.GIF>
- [7] LAKHTINE : Métallographie et traitements thermiques des métaux, ÉDITIONS MIR •
- [8] ROBERTE LEVEQUE – Aciers à outils M330 Technique de l'ingénieur 1979.
- [9] SIMONE PARENT –SIMONIN – les alliages Fer, Carbone, Chrome et Leurs dérivés-centre Technique Des Industries de la Fonderie-1983.
- [10] H.ALLAIGRE – les aciers à outils pour découpage à froid N°46 conférence prononcée à la réunion de la l'association technique de traitement thermique le 9 novembre 1972 p 1-7.
- [11] F.MARATRAY, A.POULALION et P.RABBE – Contribution à l'étude des alliages Fe – Cr –Mo – C Colloque International sur les alliages à hautes teneurs en chrome et en carbone. Saint-Etienne, 8-9 novembre 1983 p 11- 54
- [12] I. LAKHTINE : Métallographie et traitements thermiques des métaux, ÉDITIONS MIR • Moscou 1071, Traduit du russe par Valentin Polonski et revu par Olga Boulenko, Copyright by les Editions Mir U.R.S.S. 1971

REFERENCES CHP2

- [1] <http://www.voestalpine.com/bohler-edelstahl/de/>
- [2] www.assly.dz
- [3] www.presi.com
- [4] <http://www.struers.com>
- [5] <http://www.zeiss.com>
- [6] <http://fr.wikipedia.org>
- [7] <http://nebertherm.com>
- [8] fisher scientific
- [9] <http://www.buehler.com>

REFERENCES CHP3

- [1] SH. Avner,. Introduction to Physical Metallurgy. McGraw-Hill, 1982, New York.
- [2p] <https://www.hudsonsteel.com/technical-data/steelD2>
- [2] <https://heattreatmentmasters.com/heat-treatment-of-d2-tool-steel/>

- [3p] J. Valloton, D.M. Herlach, H. Henein and D. Sediako, ‘Microstructural quantification of rapidly solidified undercooled D2 tool steel’,
- [3] https://aobosteel.com/wp-content/uploads/2025/05/Aobo-Steel_Technical-Guide_-Heat-Treatment-of-D2-Tool-Steel.pdf
- [4] <https://qmnconsultants.com/heat-treatment-of-d2-and-h13-tool-steel/>
- [5] Alireza Darvishi, Mahdi Ahmadi, Effect of Double Austenitization Treatments on the Microstructure and Hardness of 11.7% Chromium and 1.4% Carbon Steel, <https://www.researchgate.net/publication/353322009>, METALL - FORSCHUNG, 75. Jahrgang, 7-8, pp 189-191, 2021.
- [6] I. Novikov, Theroy of Heat Treatment of Metals, MIR Publications, 1978, p. 361
- [7] D. O. Panov, Y. N. Simonov, L. V. Spivak and A. I. Smirnov, Stages of Austenitization of Cold-Worked Low-Carbon Steel in Intercritical Temperature Range, *The Physics of Metals and Metallography*, 2015, Vol. 116, No. 8, pp. 802–809., Pleiades Publishing, Ltd., 2015.
- [8] I. V. Gorynin, V. V. Rybin, V. A. Malyshevskii, T. G. Semicheva, and L. G. Sherokhina, Transformations of dislocation martensite in tempering secondary hardening steel, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 41, Nos. 9 - 10, 1999.
- [9] Tadeusz Nykiel, Tadeusz Hryniewicz , ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE, Vol. 4, No. 2 (4), pp49-60, December 2003.
- [10] Dieison G. Fantineli, Cleber T. Parcianello, Tonilson S. Rosendo, Afonso Reguly, Marco D. Tier, Effect of heat and cryogenic treatment on wear and toughness of HSS AISI M2, *Journal of Materials Research and Technology*, September 2020, 9(6):12354–12363.
- [11] P. Khatibi, A.B. Phillion, H. Henein, ‘Microstructural Investigation of D2 Tool Steel during Rapid Solidification’, *Powder Metallurgy*, Volume 57, Issue 1, 2014, <https://doi.org/10.1179/1743290113Y.0000000072>
- [12] R. Mesquita, Tool Steels Properties and Performance, Taylor & Francis Ed., 2017.
- [13] Mohd Aidil Shah Bin Abdul Rahim, Mohamad bin Minhat, Nur Izan Syahriah Binti Hussein, and Mohd Shukor bin Salleh, A comprehensive review on cold work of AISI D2 tool steel, *Metall. Res. Technol.* 115, 104 (2018).