



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Ingénierie des Matériaux et des Surfaces

Titre
**ETUDE DU TRAITEMENT THERMIQUE DE
L'ACIEE K110**

Proposé et encadré par :
Pr.Nacer E.Bacha

Réalisé par :
Riyadh akir
Saif Islem Rachedi

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur N.BACHA pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de m'encadrer, pour ses conseils tant au niveau scientifique et technique

De même je tiens à remercier les membres de jurys trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Table des matières

RESUME	8
INTRODUCTION	11
CHAPITRE 1	13
ACIERS A OUTILS	13
Définition :	13
1.1Fabrication des aciers à outils	14
1.1.1Elaboration du métal liquide	14
1.2/ Propriétés générales dès l'acier a outil	14
1.3 Structure de solidification	15
1.3.1 Diagrammes d'équilibre	15
1.4 Classes structurales des aciers dans le système Fe - C- Cr :	18
1.5 Mise en œuvre des lingots :	19
1.6 Critères de mise en œuvre :	20
1.6.1 Structure à l'état recuit :	20
1.6.2 Usinabilité :	21
1.6.3 Réponse au traitement thermique :	21
1.6.4 Aptitude à la rectification :	21
1.6.5 Traitement de surface :	21
1.6.6 Les propriétés d'emploi des aciers à outils :	21
1.7Classification des aciers a outils :	22
1.7.1Aciers au carbone pour travail à froid :	22
1.7.2Aciers alliés pour travail à froid :	23
1.8 Propriétés principales désirées :	25
1.8.1 Comment définir les propriétés d'emploi :	26
1.8.2Modes de mise hors service :	26
1.8.3Ténacité des aciers à outils indéformables :	27
1.9/Rôle des éléments d'alliages :	28
1.9.1/Silicium :	29
1.9.2/Chrome :	29
1.9.3/Molybdène :	30
1.9.4/Vanadium :	30
1.9.5/Manganèse :	31
1.9.6/Carbures :	31
CHAPITRE 2	33
Traitement thermique des Aciers à 12% de chrome	33

2. But des traitements des aciers à outils :	33
2.1 Chauffage des aciers à outils de travail à froid	33
2.2 Refroidissement des aciers à outils de travail à froid :	34
2.3 Constituants obtenus après chauffage et refroidissement :	35
2.3.1 Nature des carbures primaires :	38
2.3.2 Grosseur de grain :	39
2.4 Recuit des aciers à outils de travail à froid :	40
2.4.1 Recuit complet :	40
2.4.2 Recuit de détente :	40
2.4.3 Structure à l'état recuit :	41
2.5 Trempe des aciers à outils :	41
2.5.1 Trempabilité :	41
2.5.2 Description de la transformation martensitique :	43
2.5.4 Traitement par le froid :	46
2.6 Structures de revenu :	46
2.6.1 Influence des éléments d'addition sur les carbures de fer :	49
2.6.2 Formation des carbures alliés et durcissement secondaire :	50
2.6.3 Revenu des aciers contenant du chrome :	51
CHAPITRE 3	53
PROCEDURE EXPERIMENTALE	53
Introduction :	53
3.1 Matériau :	53
3.1.1 Etat de livraison de l'acier :	54
3.1.2 Composition chimique (% moyen) :	54
3.1.3 Caractéristiques de l'acier X153CrVMo12 :	54
3.1.4 Microstructure de l'acier X153CrMoV12 :	55
3.2 Données techniques sur l'acier X153CrVMo12 :	56
3.2.1 Utilisation :	56
3.3 Protocole de travail :	56
3.4 La dureté :	58
Conclusion générale	59

LISTES DES FIGURES

- Figure (1.1) : généralités sur les aciers.....7
- Figure 1. 2 : Diagramme d'équilibre Fe-C..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1. 3 : Diagramme d'équilibre Fe-Cr-C à 13 % de chrome.**Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1. 4 : Structure d'un acier lédeburitique à l'état brute de coulée .. **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1. 5 : Courbe établie par A.KULMBURG, donnant le volume de carbure en fonction..... **Erreur ! Signet non défini.**
- de la teneur en carbone pour un alliage à 12 % de chrome. ..**Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1.6 : Influence de diverses teneurs en chrome sur les teneurs limites en carbone. Conduisant à la formation d'austénite pure **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 1 (courbe TRC pour X153CrMoV12)..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 2 : Microduretés comparées des carbures contenus dans les aciers à outils..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 3 : Influence des éléments d'alliage sur la teneur en carbone de **Erreur ! Signet non défini.**
- l'eutectoïde **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 4: Courbes martensitiques pour les aciers à haut carbone (a) et à carbone **Erreur ! Signet non défini.**
- moyen (b) ($A_{rés}$: austénite résiduelle ; la martensite de la courbe en..... **Erreur ! Signet non défini.**
- pointille est celle d'après la stabilisation de l'austénite)**Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2. 6 : Influence de la température d'austénitisation sur le taux d'austénite résiduelle..... **Erreur ! Signet non défini.**

de quelques aciers d'outillage à froid alliés [18]..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2. 7 : variations de la dureté en fonction de la température de revenu (1heure) d'alliage Fer **Erreur ! Signet non défini.**

Carbone Martensitique **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2. 8: Teneur en carbone de la martensite : **Erreur ! Signet non défini.**
a-en fonction de la température de revenu (acier à 0.4 ; 0.6 et 1.2 % C); **Erreur ! Signet non défini.**

b-en Fonction de la durée du revenu (acier à 1.2 % C) **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2. 9 : Evolution de la dureté HRC en fonction de la température de revenu..... **Erreur ! Signet non défini.**

Les éléments d'alliage considérés : Cr, V, Mo, W, et Ti donnent des carbures plus stables que la cémentite. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2. 10 : Influence de la température de revenu pour un acier à 0.44% C, Mais pour une teneur différente de chrome..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 3.1. Microstructure de l'acier X153CrMoV12 après divers modes de traitement thermique.....49

Figure 3.2 : Représentation schématique du processus expérimental.....51

Figure 3.3 : Evolution de la dureté selon les différents traitements de revenu...52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Aciers au carbone pour travail à froid.....	17
Tableau 2. 1 : Caractéristiques des carbures primaires pouvant être présents dans les aciers à outils Après austénitisation.....	32
Tableau 3. 1:composition chimique (% moyen).....	49
Tableau 3.2 :Résultats des essais de dureté HRC selon les différents traitements.....	51

RESUME

Les aciers à outils de travail à froid utilisés dans notre étude sont obtenus par forgeage et laminage. Ils sont traités de manière à leur conférer une grande dureté ainsi qu'une bonne ténacité, en l'occurrence une bonne tenue à l'usure en cours d'emploi.

Notre objectif était de travailler dans un atelier de découpage d'acier (barre de fer) identique à ce que nous utilisons pour créer des piliers de béton.

Mais nous n'avons pas pu le faire en pratique à cause de virus corona donc nous avons travaillé en théorie et avec des recherches bibliographiques, et le travail le plus avancé pour cette étude (acier **X153CrVMo12**) c'est le travail de Bohler

Pour une résistance à l'usure voisine de celle des aciers X153CrVMo12, l'acier de substitution X153CrVMo12 de même teneur à basse concentration en carbone possède une meilleure résistance aux chocs, tout en gardant une dureté appréciable, permet d'offrir des barres dont la durée de vie est beaucoup meilleure. En outre il convient très bien aux travaux de découpage sévères.

ABSTRACT

The cold working tool steels used in our study are obtained by forging and rolling. They are treated to give them great hardness as well as good toughness, in this case good resistance to wear during use.

Our goal was to work in a steel (iron bar) cutting workshop identical to what we use to create concrete pillars.

But we couldn't do it in practice because of the corona virus so we worked in theory and with bibliographic research, and the most advanced work for this study (X153CrVMo12 steel) is the work of Bohler

For wear resistance close to that of X153CrVMo12 steels, the X153CrVMo12 substitution steel with the same low carbon content has better impact resistance, while maintaining appreciable hardness, making it possible to offer bars with a much better service life. In addition it is very suitable for severe cutting jobs.

ملخص

يتم الحصول على فولاذ أدوات العمل على البارد المستخدم في دراستنا عن طريق التطريق والدرفلة. يتم التعامل معها بطريقة تمنحها صلابة كبيرة بالإضافة إلى متانة جيدة، وفي هذه الحالة مقاومة جيدة للتآكل أثناء الاستخدام. كان هدفنا هو العمل في ورشة قص حديدية (حديدية) مطابقة لما نستخدمه لإنشاء أعمدة خرسانية. لكننا لم نتمكن من القيام بذلك عملياً بسبب فيروس كورونا، لذلك عملنا نظرياً ومع البحث الببليوغرافي، والعمل الأكثر تقدماً لهذه الدراسة (X153CrVMo12) هو عمل Bohler لمقاومة التآكل قريبة من تلك الموجودة في الفولاذ X153CrVMo12 ، يتمتع الفولاذ البديل X153CrVMo12 بنفس المحتوى منخفض الكربون بمقاومة تأثير أفضل، مع الحفاظ على صلابة ملحوظة، مما يجعل من الممكن تقديم قضبان ذات عمر خدمة أفضل بكثير. بالإضافة إلى ذلك فهي مناسبة جداً لأعمال القطع القاسية.

INTRODUCTION

La qualité de l'outil est directement liée à sa destination et doit répondre à certaines propriétés telles que : stabilité de forme et de dimension, ténacité, l'endurance, résistance à l'usure, l'aptitude à la coupe, l'usinabilité et surtout une grande dureté, sont des propriétés parfois contradictoires entre lesquels il faut trouver un compromis satisfaisant.

Les outils de découpage subissent des sollicitations mécaniques sévères dans leurs conditions de service.

Pour les parties actives des outils de coupe, on retrouve toujours, à un degré plus ou moins marqué, les sollicitations suivantes :

- contraintes de travail élevées, généralement en compression,
- choc,
- contacts avec glissement relatif outil-métal travaillé.

Les outils de coupe sont soumis à trois modes d'endommagement qui sont :

a) Rupture : elles peuvent être globales, elles entraînent alors la destruction totale de l'outil, ou locale (écaillage des arêtes).

b) Matage : par matage, on entend l'enfoncement de la surface travaillante de l'outil (plus particulièrement les arêtes de découpe).

c) Usure : par usure, on entend uniquement l'enlèvement progressif de matière à la surface de l'outil.

L'usure se produit préférentiellement dans les zones les plus chargées (arêtes par exemple) ou dans celles où le glissement relatif outil-métal travaillé est important (faces latérales par exemple).

De par ces conditions sévères de travail, les critères de sélection d'un matériau pour l'outil ne sont pas aisés. Ainsi, les propriétés des aciers pour travail à froid (aciers martensitiques revenus) sont assurées par des traitements thermiques particuliers.

La raison essentielle des particularités rencontrées dans le traitement thermique des aciers à outils est leur teneur élevée en carbone et d'éléments d'alliage. Ceci entraîne deux ordres de difficultés :

- les températures de chauffage nécessaires pour dissoudre le plus possible de carbures et obtenir une dureté plus grande, soit après trempe ou revenue, sont très élevées.

- la conductibilité thermique est très faible ce qui implique l'existence de gradients de températures importants lors des chauffages et des refroidissements.

Ces aciers se caractérisent par une très grande dureté supérieure ou égale à 58HRC à la température ambiante mais possèdent une faible dureté à chaud.

La tenue en service des barres sera d'autant meilleure que les propriétés suivantes seront satisfaites :

- une très grande dureté pour résister à la déformation par cisaillement du métal mis en œuvre.

- une bonne ténacité pour résister aux effets de chocs et pour éviter la rupture brutale ou les écaillages consécutifs.

- une bonne résistance à l'usure, phénomène consécutif au frottement à sec entre l'outil et le matériau découpé.

Notre acier doit présenter donc un compromis entre la dureté nécessaire à la fois à la résistance à la déformation au cours de l'opération de cisaillement, et la résistance à l'usure et la ductilité utile pour résister à l'écaillage consécutif

CHAPITRE 1

ACIERS A OUTILS

Définition

Les aciers à outils sont des aciers au carbone et alliés contenant plus de 0,5 % C. Ils sont

Caractérisés par :

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

Il peut s'agir d'opérations d'usinage (tournage, perçage, fraisage,...), de mise en forme à froid et à chaud (poinçons, lames, matrices, cylindres de laminoirs), de moulage (alliages légers, alliages de zinc, plastiques...). Les aciers à outils font partie intégrante du domaine des aciers spéciaux. [1]

L'outil peut travailler à température ambiante ou à température supérieure.

L'échauffement résulte du contact avec une matière chaude ou du travail de frottement.

Il doit alors résister aux déformations plastiques et à l'usure (conservation de forme, dimensions et propriétés) afin de pouvoir répondre aux conditions de travail. La figure 1.1 représente le classement des différents aciers couramment employés. [1]

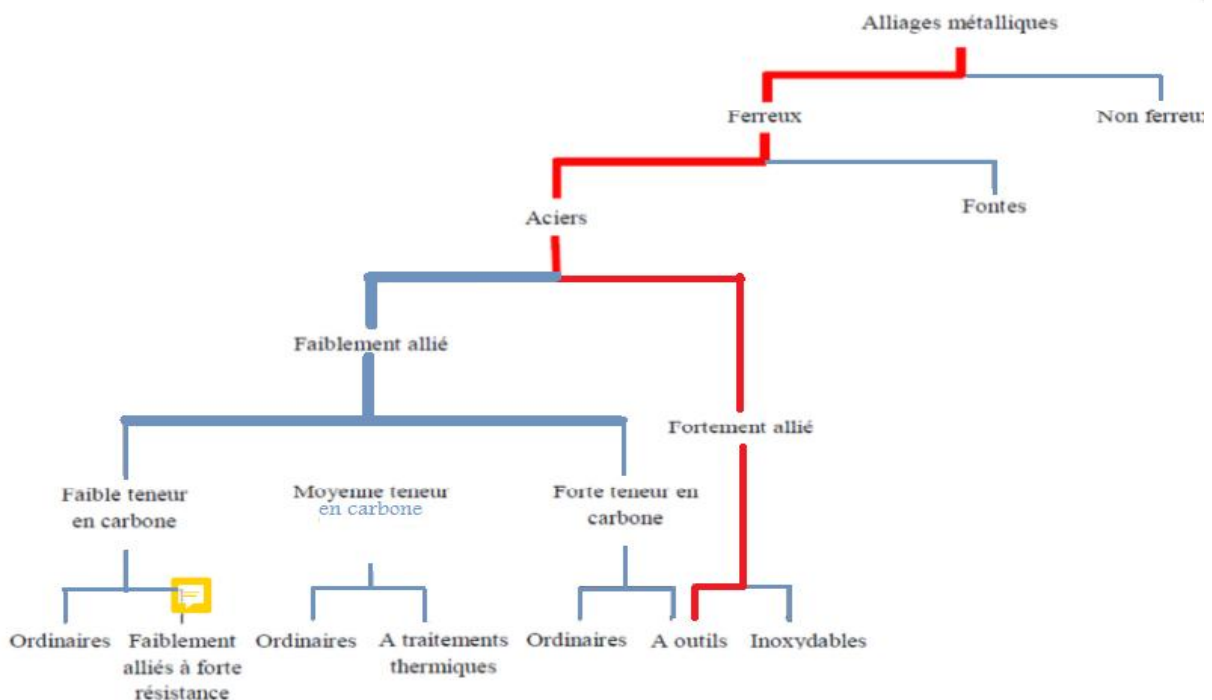


Figure 1.1: Classement des différents aciers couramment employés [1]

1.1 Fabrication des aciers à outils

1.1.1 Elaboration du métal liquide

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.

1.2/ Propriétés générales des l'acier a outil

Par rapport aux aciers de construction mécanique les aciers à outils se diffèrent par leur Conditions et domaine d'utilisations exigeant des critères d'emploi par fois contradictoire entre eux.

Par exemple pour un acier à outils de qualité, on recherche l'optimum entre dureté et ténacité sans fixer de limite inférieure, alors que pour un acier de construction mécanique c'est une aptitude suffisante à l'emploi avec des caractéristiques spécifiques bien déterminées qui est privilégiée, comme la tenue à la fatigue, la résistance à la rupture brutale, l'aptitude à suivre un cycle thermomécanique au cours de la mise en œuvre et l'usinabilité.

Par ailleurs, l'acier à outils est sollicité dans la plupart des cas au niveau de sa surface qui doit supporter les contraintes les plus sévères alors que les sollicitations d'un acier de construction mécanique intéressent le matériau dans son ensemble.

La recherche de dureté explique la présence combinée de carbone, en premier lieu, mais également d'éléments d'addition favorisant la trempabilité (capacité d'obtenir une dureté homogène même sur de grosses sections). Ces éléments peuvent être carburigènes (générant des carbures dans la matrice) afin d'obtenir une résistance à l'usure ou une tenue à chaud.

1.3 Structure de solidification

1.3.1 Diagrammes d'équilibre

1.3.1.1 Diagramme fer - carbone

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. [1]

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

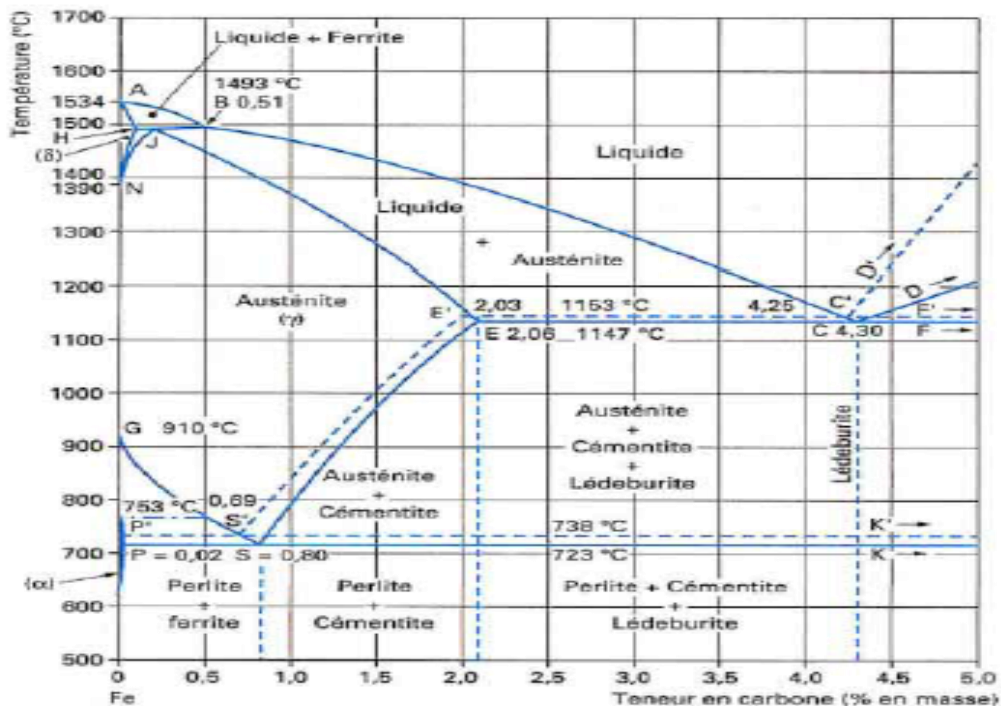


Figure 1.2 : Diagramme d'équilibre Fe-C [1]

1.3.1.2 Diagramme fer - chrome - carbone [2]

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).

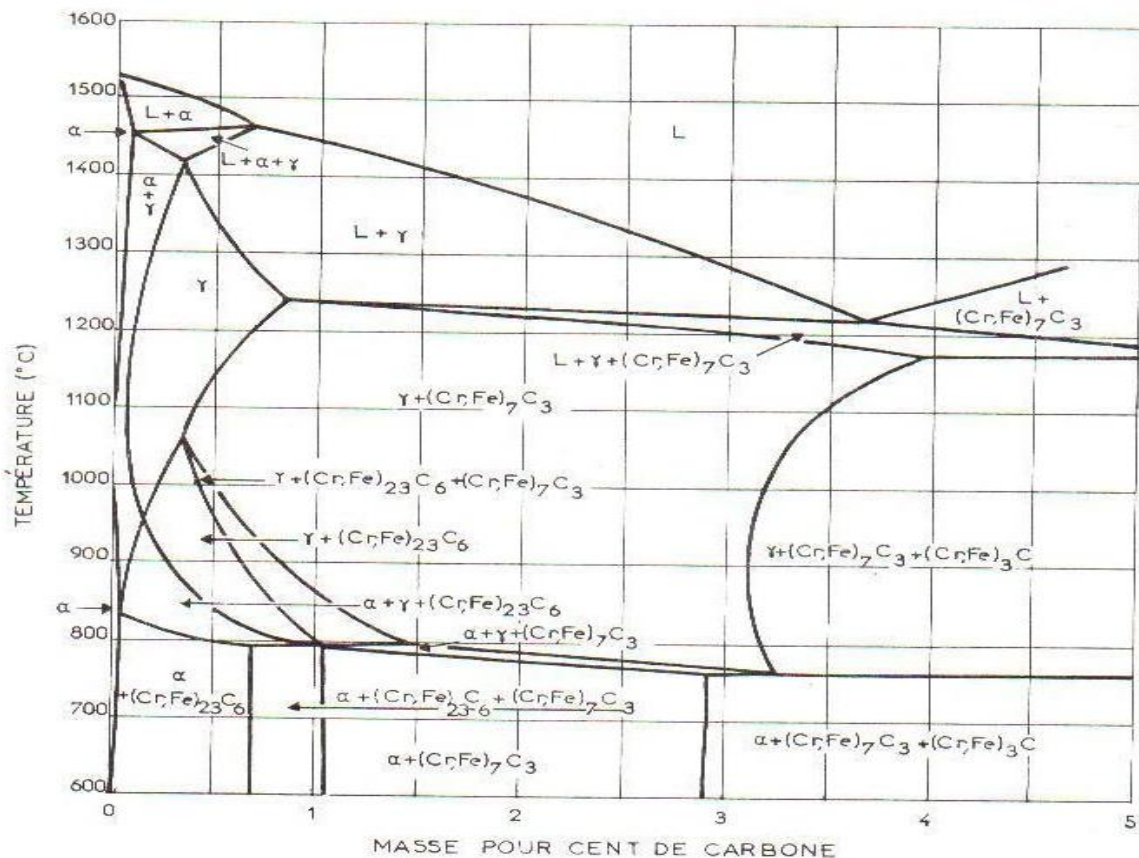


Figure 1.3 : Diagramme d'équilibre Fe-Cr-C à 13 % de chrome [2]

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

- d'une part : les carbures dits eutectiques $(Cr,Fe)_7C_3$, 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.

- 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 1.4 : Structure d'un acier lédeburitique à l'état brute de coulée [6]

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 :

$$K\% = 11.3 C \% + 0.5 Cr \% - 13.4 \quad [4]$$

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

Par ailleurs, A. KULMBURG à établi une courbe, montrée à la figure 5, donnant le volume de carbure formé en fonction de la teneur en carbone, pour un alliage à 12% de chrome

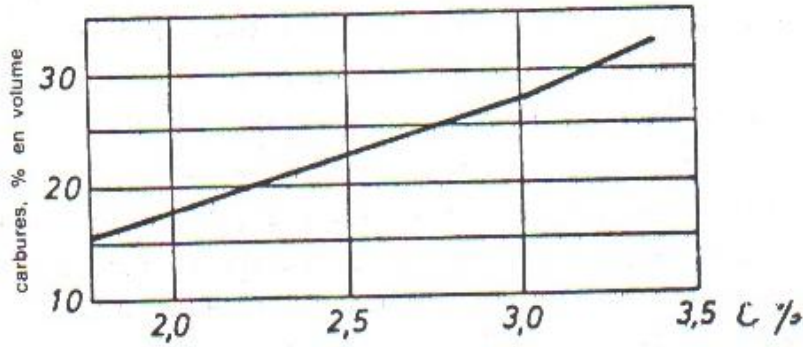


Figure 1.5 : Courbe établie par A.KULMBURG, donnant le volume de carbure en fonction de la teneur en carbone pour un alliage à 12 % de chrome. [2]

1.4 Classes structurales des aciers dans le système Fe - C- Cr [5]

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

- 1) hypoeutectoides avec une structure de ferrite alliés excédentaire ;
- 2) eutectoides ;
- 3) hypereutectoides contenant des carbures en excès (secondaires) précipités par l'austénite en refroidissement.

Les aciers alliés hypoeutectoides, eutectoides et hypereutectoides 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. La figure 1.6 donne les classes structurales des aciers dans le système Fe-C-Cr .

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. [5]

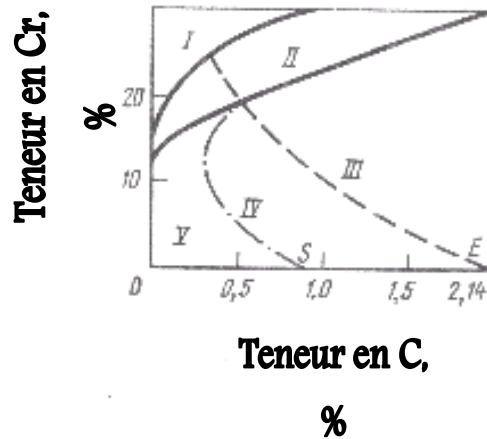


Figure 1.6 : Classes structurales des aciers dans le système Fe-C-Cr :
 I- Acier ferritique ; II- Acier demi-ferritique ; III- Acier lédéburitique; IV-
 Acier hypereutectoïde ; V- Acier hypoeutectoïde [5]

A toutes les températures la structure d'un tel acier se compose de ferrite alliée 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.

1.5 Mise en œuvre des lingots

Pour l'opération de forgeage, les cycles de chauffage des lingots doivent être déterminés avec soin et surtout bien respectés, afin d'assurer une certaine homogénéisation de la structure, par dissolution des carbures dans la phase austénitique et diffusion des éléments d'alliage ségrégés.

D'une manière générale, les aciers de travail à froid peuvent être chauffés jusque 1100 °C, avec une vitesse de chauffage inférieure à 150 °C/h. [1]

Pour les aciers au chrome lédéburitiques qui présentent à la fin de la solidification un réseau de carbures eutectiques insolubles en lamelles autour de grains ferritiques, qui lors des déformations ultérieures du lingot par forgeage, subissent deux transformations:

- D'abord au cours du chauffage à température élevée, ils tendent à coalescer, les lamelles se transforment en globules qui grossissent lorsque les maintiens sont prolongés.
- Le deuxième effet de la déformation est de modifier la position des carbures dans le métal. Dans les premiers stades de la déformation, le métal garde un aspect cellulaire, les grains allongés restant entourés d'un réseau de carbure. Un accroissement de la déformation fait

disparaître ce réseau, les carbures étant d'abord alignés dans le sens de l'allongement, puis de plus en plus dispersés d'une manière homogène dans la matrice ferritique, si on applique un taux de corroyage élevé.

Dans le cas des aciers à outils qui ne présentent pas, à l'état brut de coulée, de réseau de carbures, un taux de corroyage minimal est souvent suffisant.

Après ce traitement de transformation, les produits sont refroidis lentement et recuit avant d'être réchauffés pour l'opération de laminage.

Après laminage, opération qui nécessite les mêmes précautions au niveau du chauffage et de la température de maintien que le forgeage, les produits semi-ouvrés que l'on appelle, suivant les dimensions, blooms, brames, billettes, larget sont refroidis très lentement, recuits et contrôlés :

- Contrôle des états de surface.
- Contrôle de la santé interne.

- Contrôle de la qualité du produit : les produits doivent, après recuit, satisfaire à un certain nombre d'exigences métallurgiques, telles que la grosseur de grain la plus fine possible, une bonne répartition des carbures, l'absence de décarburation

1.6 Critères de mise en œuvre

Ces critères (propriétés) doivent assurer, pour les diverses étapes de l'élaboration de l'outil, une fabrication facile et rapide sans risques d'incidents.

Les aciers à outils utilisés pour la mise en forme ou le découpage des métaux doivent satisfaire à un certain nombre de critères de mise en œuvre dont: [6] [7]

1.6.1 Structure à l'état recuit

Le but de recuit est de donner à l'acier une structure et un niveau d'adoucissement tel que sa mise en œuvre soit plus aisée, les conséquences attendues de ce traitement sont donc:

- Un usinage plus facile.
- une mise en forme plus aisée par transformation mécanique.
- Une structure appropriée aux traitements thermiques ultérieurs.

On effectue en général sur les aciers à outils deux types de recuit: le recuit complet et le recuit de détente.

1.6.2 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 sphéroïdes et bien répartis dans la matrice.

1.6.3 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.

1.6.4 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 muabilité qui représente, le rapport du volume de métal enlevé au volume d'abrasif utilisé.

1.6.5 Traitement de surface

Ces traitements ont pour but essentiel d'améliorer les propriétés mécaniques des couches superficielles des outillages, en particulier la résistance à l'usure et à la déformation.

Exemple de traitement : Nitruration. Chromisation.

1.6.6 Les propriétés d'emploi des aciers à outils

On distinguera les caractéristiques à la température ambiante et les caractéristiques à chaud. 5 principaux critères sont retenus : [8]

- La ténacité : résistance à l'amorçage et à la propagation des fissures.
- La dureté : résistance du matériau à la pénétration. Pour les aciers à outils pour travail à chaud, on s'intéresse également à l'évolution de la dureté en fonction de la température de revenu.
- La résistance à la fatigue thermique : résistance aux effets de chauffages et refroidissements successifs qui peuvent générer des fissures. Cette caractéristique est influencée par la

cinétique d'oxydation, les propriétés physiques et mécaniques (notamment diffusivité thermique qui influence le gradient thermique, module d'Young et coefficient de dilatation linéaire) et par la microstructure.

- La résistance à l'usure caractérisée par la faculté, pour la surface de l'outil, de conserver son état initial le plus longtemps possible sans endommagement lors de son utilisation. Sans rentrer dans les différents aspects de ce sujet, on peut dire qu'entre en compte la taille des grains, le taux d'austénite résiduelle, la surface utile (quantité, répartition, géométrie...) et la dureté des carbures primaires. L'indication du tungstène équivalent permet une estimation de la résistance à l'usure liée à la composition chimique.

- La tenue à la corrosion. Ce sujet qui est fonction du milieu ambiant n'est pas développé ici, nous retiendrons simplement l'usage de chrome dans la composition chimique. Au-delà de ces propriétés d'emploi, il faut prendre en compte les conditions de mise en œuvre lors de la fabrication de l'outil, notamment l'élaboration, l'usinage, le traitement thermique, le traitement de surface, la rectification et l'obtention d'une texture superficielle.

L'acier doit par exemple présenter une bonne trempabilité pour que la structure soit homogène sur de très grandes épaisseurs après le traitement thermique.

1.7 Classification des aciers a outils

On distingue actuellement quatre classes d'aciers à outils : [8]

- Classe 1 : aciers au carbone pour travail à froid.
- Classe 2 : aciers alliés pour travail à froid.
- Classe 3 : aciers pour travail à chaud
- Classe 4 : aciers à coupe rapide

1.7.1 Aciers au carbone pour travail à froid

Ce sont des aciers au carbone destinés pour le travail à froid. Cette classe d'aciers est utilisée pour l'outillage à main. Les aciers au carbone doivent assurer, après trempe et revenu à basse température, une dureté élevée de l'arête tranchante des outils (60 à 65) HRC, nettement supérieure à celle du métal usiné, ainsi qu'une bonne tenue à l'usure pour conserver l'état de l'arête tranchante.

La faible stabilité de l'austénite sur fusionnée affaiblit la pénétration de trempe des aciers à outils au carbone. La pénétration de trempe totale lors du refroidissement à l'eau ne s'obtient que pour des dimensions inférieures à (10 à 12) mm des outils.

C'est pourquoi les nuances contenant entre 0,5 et 1,2 % de carbone, s'emploient généralement pour des outils de petites dimensions (limes, forets aléseurs, ...).

Dans le cas où les outils subissent en service des charges dynamiques, il est recommandé d'utiliser des aciers hypoeutectoïdes et eutectoïdes traités thermiquement, de manière à obtenir une structure de type troostite.

Pour les outils, (comme les fraises, tirets, scies, grattoirs, ...), on emploie des aciers hypereutectoïdes (1 à 1,3) % C traités et à structure composée de martensite et de carbures.

Les aciers au carbone présentent les avantages suivants :

- Prix modéré.
- Faible dureté et bon usinage à l'état recuit.
- Bonne aptitude à la transformation à l'état recuit.

Quelques nuances d'aciers à outils de la classe 1, avec des exemples d'applications, sont exposées dans le tableau ci-après. Le tableau 1 donne les aciers au carbone destinés pour le travail à froid.

1.7.2 Aciers alliés pour travail à froid

Ce sont les aciers à outils pour travail à froid. Les aciers à outils alliés pour travail à froid, de même que les aciers à outils au carbone ne sont pas très résistants, et de ce fait, sont employés pour la coupe des matériaux relativement doux et à de faibles vitesses de coupe, la température en service ne dépasse pas 2350°C.

Les aciers à outils alliés au chrome, vanadium, molybdène, font preuve d'une grande stabilité de l'austénite surfusionnée et par suite d'une grande pénétration de trempe.

Le traitement thermique comporte une trempe à l'huile et un revenu à 200°C afin de réduire les déformations et les gauchissements des outils. Les aciers à outils pour travail à froid sont de plusieurs sortes.

1.7.2.1/ Aciers au manganèse et au manganèse-vanadium

Les teneurs moyennes sont de l'ordre de 0,8 % C, 2,1 % Mn et de 0 à 0,25 % V. Les aciers de cette classe sont appelés aciers indéformables. Ils ont pour principale

Caractéristique, une bonne indéformabilité au traitement thermique due à une température de trempe relativement basse. On les trempe, soit à l'huile, soit au bain de sels par trempe étagée.

Ils forment une solution commode pour les outils de précision et de mesure, ne demandant pas

une résistance particulière à l'usure (poinçons, matrices de découpage, calibre vérificateurs, instruments de mesure...).

Tableau 1 : Aciers au carbone pour travail à froid.[1]

Nuances AFNOR	Température moyenne (°C)			Dureté HRC	Applications
	Recuit	Trempe	Revenu		
XC 50	750 à 780	830 E	150 à 300	54	Outils de forage, fourches, râteaux.
XC 60	750 à 780	825 E 850H	200 à 300	60 à 63 60 à 62	Petites matrices, outils de chocs, barres.
XC 70	750 à 780	800 E 850 H	150 à 250	61 à 63	Scie à bois, marteaux, fers de rabots.
XC 80	750 à 780	800 E 800 H	150 à 250	63 à 64 62	Matrices, cisailles, poinçons, estampes, scies circulaires.
XC 90	750 à 780	790 E 790 H	150 à 300	63 à 64 63	Burins, tourneurs, coutellerie, matrices, chirurgie.
XC 100	700 à 750	790	150 à 250	63 à 65	Ciseaux, burins, poinçons, touches à froid
XC 110	700 à 750	780 E	150 à 250	64 à 65	Matrices à chaud, Outils pour meules.
XC 120	700 à 750	180 E	150 à 250	65	Calibres, jauges, burins, outils à bois.
Recuit : recuit d'adoucissement, E : eau, H : huile					

1.7.2.2/ Aciers au chrome

La composition moyenne comporte les additions suivantes : (1 à 2,1) % C, (0,2 à 1,3) %Cr, (0 à 0,25) % V. Les aciers à faible teneur en chrome présentent une faible trempabilité et sont employés pour de petits outils à fabriquer en grande série (mèches, tarauds, ...), et pour des pièces demandant une bonne tenue au choc ou à la flexion (extracteurs, butées,...).

Les nuances, à plus forte teneur en chrome (13 %) et contenant du vanadium, sont très indéformables et très résistantes à la flexion et sont destinées à la fabrication, par exemple, de filières, mandrins d'étirage, galets de formage, matrices d'extension à froid, molettes de coupes, fraises et outils à bois.

1.7.2.3/ Aciers au chrome-molybdène

La composition moyenne de ces aciers comporte : (1 à 1,5) % C, (5 à 12) % Cr, (0,9 à 1,1) % Mo, (0,1 à 0,4) % V. Les aciers de ce type se déforment très peu à la trempe et sont employés pour les mêmes catégories d'outils que précédemment.

1.7.2.4/Aciers au chrome-tungstène

Ces aciers contiennent en général, les teneurs suivantes : (0,4 à 1,1) % C, 0,9 % Mn, (0,85 à 1,1) % Cr, (1 à 2) % W. Ces aciers sont d'un emploi très général, ils sont durs, tenaces et d'un assez grand pouvoir trempant. Leur application est très variée, outils coupants (forets, mèches, cisailles.), alésoirs, tarauds, filières, poinçons, matrices, etc.

1.7.2.5/Aciers au nickel-chrome

Ces aciers contiennent 0,35 % C, 1,7 % Cr, 3,75 % Ni. C'est une nuance particulière, réservée pour les outillages d'estampage à froid, comportant des gravures de grande finesse et d'un prix élevé.

1.8 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. [8]

- 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 cyclage de contraintes mécaniques. [9]

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.

1.8.1 Comment définir les propriétés d'emploi

Les propriétés d'emploi relatives à la tenue en service ont été choisies à partir : [7]

- de l'analyse des sollicitations auxquelles sont soumis les outils,
- de leurs modes de mise hors service.

Sollicitations

Pour les parties actives des outils de coupe, on retrouve toujours, à un degré plus ou moins marqué, les sollicitations suivantes :

- contraintes de travail élevées, généralement en compression,
- choc,
- contacts avec glissement relatif outil-métal travaillé.

1.8.2 Modes de mise hors service

a) Rupture : les ruptures sont fréquentes dans les outils de découpage .elles peuvent être globales, elles entraînent alors la destruction totale de l'outil, ou locales (écaillage des arêtes)

b) Matage : par matage, on entend l'enfoncement de la surface travaillante de l'outil (plus particulièrement les arêtes de découpe).

c) Usure : par usure, on entend uniquement l'enlèvement progressif de matière à la surface de l'outil.

L'usure se produit préférentiellement dans les zones les plus chargées (arêtes par exemple) ou dans celles où le glissement relatif outil-métal travaillé est important (faces latérales par exemple).

1.8.3 Ténacité des aciers à outils indéformables

La ténacité, qui se définit par la faculté d'accommoder un niveau de contraintes élevé sans avoir de rupture brutale, peut être assez bien mesurée dans le cas des aciers à outils indéformables par essai de flexion par choc qui englobe à la fois la résistance à l'initiation et à la propagation des fissures. [6]

Pour les outils de coupe, la fiabilité d'un matériau est déterminée par l'aptitude de celui-ci à supporter sans rupture les chocs mécaniques répétés. Pour une pièce donnée, la microstructure qui est le résultat de la composition chimique choisie et l'histoire thermique de la pièce sont en effet les paramètres essentiels à considérer

1.8.3.1 Influence de la microstructure sur la résistance aux chocs

Plusieurs études ont conclu que la résistance aux chocs des aciers à outils indéformables est tributaire de la quantité et la qualité des carbures résultant de la composition chimique de l'alliage ainsi que le type de la matrice obtenue sous diverses conditions de refroidissement

1.8.3.1.1 Effets des carbures

En effet l'examen approfondi de la surface de rupture dans les deux types de matrice (austénitiques et martensitique) a révélé l'existence d'une grande proportion de carbures eutectiques par rapport à la surface externe. Cela reflète la nature fragile des carbures eutectiques, qui favorise le développement des fissures dans les pièces. L'augmentation de la quantité de carbures fait automatiquement réduire le volume de la surface entre ces carbures, ce qui aura comme conséquence pour les deux types de matrice une dégradation de la ténacité des pièces.

En revanche, la réduction de leur proportion dans la microstructure, l'affinement de leurs dimensions, l'augmentation de la distance entre les particules de carbures ainsi que la

sphéroïdisation de leur forme, améliorent nettement la résistance aux chocs des aciers à outils au chrome. [22] [23]

L'optimisation des conditions de traitements thermiques permet d'agir sur la répartition et la forme des précipités de carbures secondaires, le traitement de détention à basse température contribue également à l'amélioration de la ténacité des aciers à outils tout en gardant de meilleures propriétés de dureté et d'usure.

1.8.3.1.2 Effets de la matrice

Pour ce qui est de l'effet du type de la matrice, une structure à matrice austénitique est en réalité moins résistante aux chocs mécaniques répétés, car la matrice tend à se transformer dans la surface externe en martensite. L'expansion volumique qui accompagne la formation de la martensite, produit des contraintes de compression au niveau des surfaces ce qui engendre des tensions de contrainte interne, favorisant ainsi la fissuration des carbures eutectiques et l'écaillage des surfaces des pièces en service. Dans le cas des outils de coupe en aciers à haute teneur en chrome travaillant aux chocs mécaniques répétés, le phénomène d'écaillage est dû aux contraintes résiduelles présentes dans les lames. [22] [23]

Après trempe, donnant une forte quantité d'austénite résiduelle pour ce type d'aciers, qui lors du refroidissement après le revenu, cette austénite se transforme soit en nouvelle martensite, soit en bainite. Ce phénomène, qui a été appelé assez justement trempe secondaire, provoque un durcissement secondaire d'autant plus important que la quantité d'austénite résiduelle est plus grande.

Dans le cas des aciers ne contenant que du chrome, le durcissement secondaire est du essentiellement, sinon uniquement, à cette transformation de l'austénite. Ceci imposerait de faire un second revenu pour éliminer les contraintes provenant de cette trempe secondaire.

1.9/Rôle des éléments d'alliages [1] [4] [5] [8] [11] [12]

Les connaissances accrues sur l'influence des divers éléments d'alliages permettent d'imaginer des compositions parfaitement adaptées à tel ou tel emploi. Il semble qu'on s'éloigne de plus en plus des nuances à tout faire, donnant un rendement moyen dans beaucoup de cas, au profit des nuances plus spécialisées donnant de très hauts rendements dans un petit nombre de cas bien déterminés.

1.9.1/Silicium

Le silicium ne forme pas de carbures et reste dissous dans la ferrite pour augmenter la dureté, et surtout augmente la résistance à l'adoucissement dans le domaine de température de revenu

150 – 300 °C des aciers trempés.

Il se trouve dans tous les aciers à outils à une teneur voisine de 0,3%, car il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration.

En fait, des études récentes ont montrés qu'il pouvait être avantageux d'augmenter sa teneur jusqu'aux environs de 1%, pour plusieurs raisons :

- réduction des ségrégations de carbures par suite d'une diminution de l'intervalle de solidification.
- augmentation de la trempabilité.
- diminution de la teneur en C de 0,1 à 0,2%.

1.9.2/Chrome

A une action nette sur la trempabilité, en outre a une tendance croissante à la formation de carbures. Les carbures peuvent être de type M_3C (substitution du chrome à une partie de fer dans la cémentite) ou Cr_7C_3 et $Cr_{23}C_6$, plus durs que la cémentite et ont tendance à améliorer la résistance à l'usure, et s'opposent au grossissement du grain lors de l'austénitisation. Il provoque, par ailleurs, un certain retard à l'adoucissement lors du revenu, ce qui améliore la résistance à chaud.

Le chrome diminue beaucoup la solubilité du carbone dans l'austénite c'est-à-dire déplace vers la gauche le point E du diagramme Fer-carbone (voir figure ci-dessous), on voit qu'avec 5% de chrome l'austénite dissout moins de 1.4% de carbone, avec 12% la solubilité est inférieure à 1%.

Pour des teneurs supérieures, il restera donc, quel que soit la température de chauffage, des carbures eutectiques non dissous dans une structure dite lédeburite. C'est le cas d'un acier très courant contenant 2% de carbone et 12% de chrome.

A partir de 13%, c'est le constituant de base des aciers inoxydables. Nous le rencontrerons dans certains outils de coupe, tels que les instruments de chirurgie sous réserve que cet élément ne soit pas trop fixé sous forme de composé défini du type carbure ou nitrure.

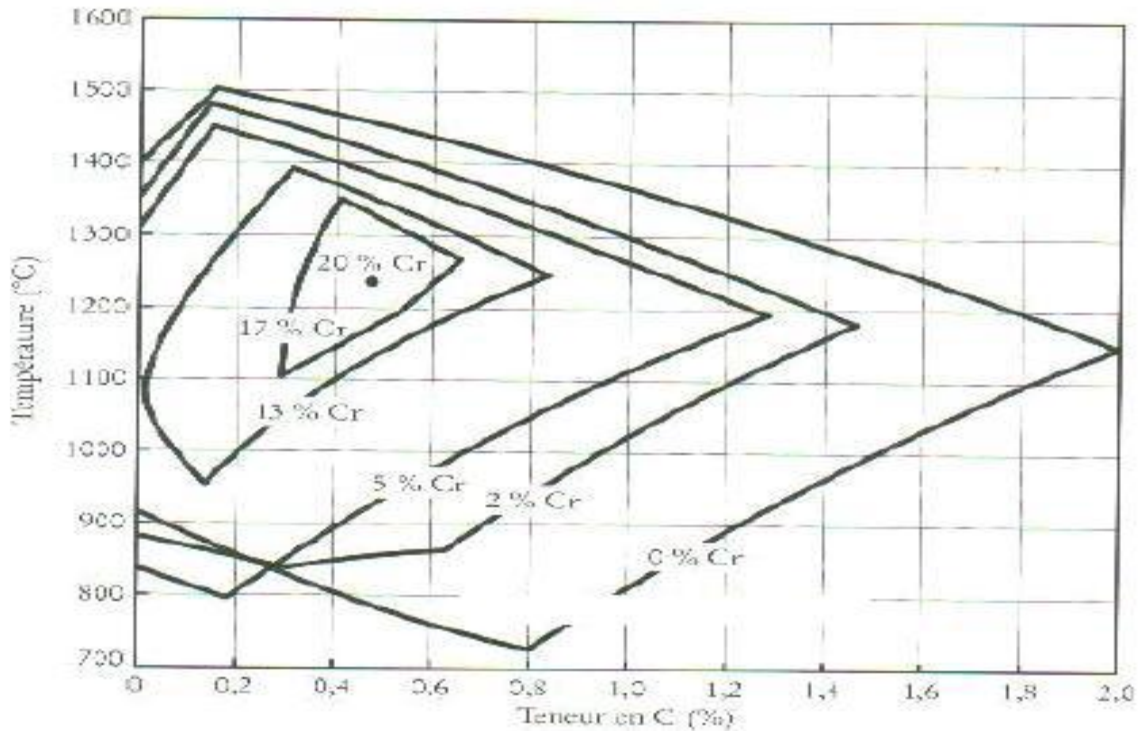


Figure 1.7 : Influence de diverses teneurs en chrome sur les teneurs limites en carbone.
Conduisant à la formation d'austénite pure [12]

1.9.3/Molybdène

Se comporte a beaucoup de point de vue comme le chrome, il forme des carbures spéciaux de type MO_2C ou MO_6C . La formation de MO_2C est accompagnée d'un fort durcissement structural qui contribue à augmenter la résistance au revenu. Il augmente la trempabilité mais sous réserve d'un relèvement de la température de trempe assurant la dissolution des carbures.

Par la présence de carbure primaire, formé lors de la solidification, cet élément s'oppose au grossissement du grain lors de la trempe.

Inconvénients : plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation catastrophique pour des maintiens entre 1000 et 1100 °C.

1.9.4/Vanadium

Est essentiellement un élément formateur de carbures. Sa solubilité dans la ferrite en présence de carbone est très faible.

Il se trouve à l'état de carbure VC (ou V_4C_3) et, en présence d'autres éléments, en substitution partielle dans les carbures M_3C , M_2C , $M_{23}C_6$ ou M_6C .

Il précipite alors, au cours du revenu, en provoquant un important durcissement structural, tel, parfois, que la dureté peut dépasser celle de l'état brut de trempe.

Ces phénomènes permettent le maintien de la dureté aux températures élevées, ce qui fait employer le vanadium dans les aciers pour travail à chaud.

D'autre part, le carbure de vanadium est très dur et très résistant à l'abrasion. De sorte qu'on trouve cet élément dans les aciers soumis à une forte usure.

De petites additions, voisines de 0.2% en masse, sont très efficaces pour éviter le grossissement du grain lors du traitement thermique.

1.9.5/Manganèse

Il se trouve, en général, présent comme éléments résiduel à des teneurs comprises entre 0,3 et 0,5% il faut signaler toute fois que certains aciers à outils contiennent jusqu'à 2% de manganèse pour problèmes de trempabilité.

1.9.6/Carbures

Un carbure est une liaison chimique entre principalement le carbone et un des éléments carburigènes. Les carbures métalliques permettent aux outils de travailler avec une arête tranchante dont la température peut atteindre (800-1000 °C): grandes vitesses de coupe. Lorsque la teneur en éléments carburigènes (Mn, Cr, W, Mo) est faible, ils se dissolvent dans la cémentite en remplaçant dans cette dernière les atomes de fer. La composition de la cémentite dans ce cas s'exprime par la formule $(Fe, M)_3C$ ou M est l'élément d'alliage. .

Le manganèse peut remplacer tous les atomes de fer du réseau de la cémentite ($Fe_3C \rightarrow Mn_3C$), le chrome jusqu'à 25%, le molybdène jusqu'à 3% et le tungstène rien que 0,8 à 1%. [5]

Les éléments carburières plus forts (Ti, V, Nb, Zr) ne se dissolvent pratiquement pas dans la cémentite et forment des carbures correspondants.

Un acier à teneur accrue en chrome, peut donner lieu en fonction de la proportion de carbone à la formation des carbures spéciaux .Les carbures spéciaux formés par les éléments d'alliage sont capables de dissoudre le fer et d'autres éléments métalliques. Ainsi, le carbure Cr_7C_3 à 20°C dissout jusqu'à 55% du fer en formant un carbure complexe $(Cr,Fe)_7C_3$; le carbure $Cr_{23}C_6$ jusqu'à 35% du fer en formant un carbure $(Cr,Fe)_{23}C_6$.

Les carbures formés dans les aciers alliés peuvent être classés en deux groupes.

Le premier est celui des carbures du type M_3C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$ et M_6C (M_4C) au réseau cristallin complexe. Les carbures de ce groupe sont caractérisés au chauffage par leur solubilité relativement facile dans l'austénite.

Le deuxième groupe est constitué de carbures MC (VC , NbC , TiC , TaC) à réseau cubique, WC à réseau cubique centré, W_2C et Mo_2C à réseau hexagonal. Ces carbures se rapportent aux composés interstitiels.

A la différence des carbures du premier groupe, les composés interstitiels ne se dissolvent pas dans l'austénite dans les conditions réelles de chauffage de l'acier.

La remise en solution des carbures est difficile lorsque les proportions de l'élément métallique et du carbure augmentent.

Selon la composition chimique de notre acier, les éléments d'alliages existants sont susceptibles de former éventuellement des carbures de chrome. La précipitation de carbures spéciaux par revenu entre $500^\circ C$ et $700^\circ C$, entraînant le durcissement secondaire. [1]

Le carbure Mo_2C provoque, un durcissement structural et ralenti ainsi l'adoucissement pendant le revenu.

Le carbure de Vanadium a une solubilité nette dans l'austénite et peut rester dissout lors de la trempe. Il précipite alors au cours du revenu en provoquant un important durcissement structural tel que la dureté peut dépasser celle de l'état brut de trempe, ces phénomènes permettent le maintien de la dureté aux températures élevées.

Plus les carbures sont dispersés dans l'acier plus sa dureté et sa résistance sont importantes, car ces carbures augmentent la résistance à la déformation plastique

CHAPITRE 2

Traitement thermique des Aciers à 12% de chrome

2. But des traitements des aciers à outils

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

* D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes : [13]

Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , A % en donnant une meilleure tenue de l'élément.

Amélioration de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure et aux chocs.

* De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

* de supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subit une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

2.1 Chauffage des aciers à outils de travail à froid

Le chauffage doit permettre de porter à la température choisie l'ensemble de l'outil. Ainsi, pendant tout le chauffage, il existe un gradient de température entre la surface et le coeur de l'outil, gradient d'autant plus important que le chauffage est plus rapide et l'outil de plus forte section. Ce gradient engendre des hétérogénéités de dilatation. [14]

Ces écarts de dilatation peuvent, à l'instant où ils apparaissent, engendrer des déformations surtout pour des pièces de forme compliquée.

Il sera donc préférable de réaliser un chauffage d'autant plus lent que la section de l'outil à traiter sera plus forte et, éventuellement, de procéder à des interruptions du chauffage pendant lesquelles le gradient de température se résorbera, tout au moins pour sa plus grande part.

Le mode de chauffage importe peu, puisqu'on peut l'effectuer suivant les conditions disponibles. L'important, c'est que la pièce ne soit pas placée froide dans une enceinte chaude.

La première précaution recommandée, c'est de placer les pièces dans un four froid de façon à ce que la température augmente en même temps que celle du four, où le chauffage progressif s'impose.

Le second risque que courent les aciers à outils lors du chauffage est l'altération chimique de la surface et, en premier lieu, la décarburation. C'est essentiellement aux températures

relativement élevées, c'est-à-dire en dessus de 700 à 800 °C, qu'il y a des risques d'enlèvement de carbone de la surface, entraînant : [8]

- L'usure prématurée, celle-ci s'explique à la fois par la dureté superficielle trop faible et par la diminution en surface de la concentration en carbures.

- Un enfoncement par manque de dureté de la partie travaillante peut conduire à des écaillages ultérieurs, que l'on attribue parfois, par erreur, à une fragilité excessive du métal.

- La résistance mécanique plus faible de la zone décarburée peut entraîner, dans certains cas, la mort de l'outil par l'apparition de fissures dans les parties les plus sollicitées.

- La décarburation est souvent moindre dans un four électrique ou l'atmosphère est de l'air, que dans un four à combustion où les gaz brûlés pourraient contenir des proportions critiques de gaz carbonique convenables pour une décarburation active.

La durée de chauffage et du maintien à température donnée doit être particulièrement surveillée. Par expérience, on peut dire que la pièce apparaît sombre dans la masse rouge du four, lorsqu'elle atteint sa température, elle sera de la même couleur.

Compte tenu de la diffusion plus lente des éléments d'alliage, la durée de maintien doit être suffisante pour que la dissolution des carbures et l'homogénéisation de l'austénite soient atteints. Cependant, s'il y a trop peu de carbures dissous, on risque, lors de la trempe, de ne pas atteindre la dureté désirée. S'il y en a trop, on peut avoir trop d'austénite résiduelle et, surtout, on peut provoquer un grossissement exagéré du grain, entraînant, de la fragilité. [16]

Pour les aciers à outils à haute teneur en chrome contenant des carbures M_7C_3 , la température d'austénitisation est plus élevée (supérieure ou égale à 960°C) car la mise en solution de ces carbures est plus difficile.

2.2 Refroidissement des aciers à outils de travail à froid

La gamme des vitesses de refroidissement est extrêmement large : elles peuvent varier depuis les plus faibles, correspondant par exemple à celle d'un four dont le chauffage est arrêté, jusqu'aux plus rapides dans la trempe à l'eau salée, car la structure de l'acier est étroitement liée à cette vitesse.

Les structures obtenues alors, peuvent varier depuis une juxtaposition d'éléments ferrite et carbures bien séparés lorsque le refroidissement est très lent, jusqu'à une solution en sursaturation de carbone dans la ferrite (martensite) lorsque le refroidissement est très rapide. Voir figure 2. 1 (courbe TRC pour X153CrMoV12)

La vitesse minimale de refroidissement qui correspond à la transformation de toute l'austénite surfusionnée jusqu'au point Ms en martensite est dite vitesse critique de trempe (V_c).

Quand la vitesse de refroidissement dépasse cette vitesse critique, l'austénite ne subit que la transformation martensitique

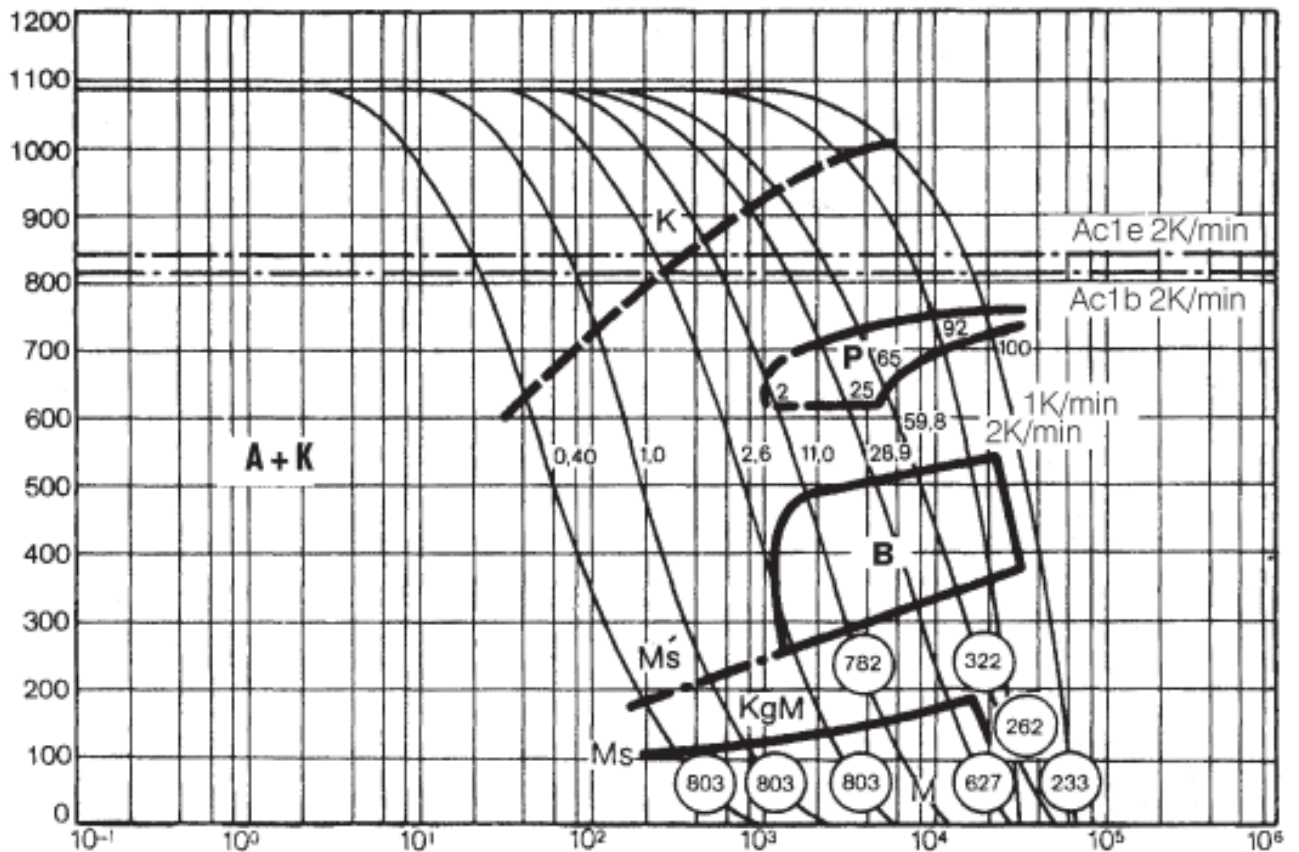


Figure 2. 1 (courbe TRC pour X153CrMoV12) [14]

2.3 Constituants obtenus après chauffage et refroidissement

Si l'on reprend comme base le diagramme fer - carbone, on constate qu'au cours du chauffage et dès 720°C, le mélange de ferrite et de cémentite, qui est le constituant stable de l'acier à la température ambiante, se transforme en austénite.

Les éléments d'alliage modifient la forme du diagramme fer - carbone; les éléments alphagènes, favorables à la formation de la ferrite (chrome, molybdène, tungstène, vanadium, silicium, aluminium), réduisent de façon importante le domaine des teneurs en carbone et l'intervalle de température qui correspondent à l'austénite pure (Voir figure 1. 2 : diagramme d'équilibre Fe-Cr à 13% de Cr)

Tous ces éléments tendent à élever les points de transformation ferrite → austénite au chauffage. Par contre, les éléments gammagènes, favorables à la formation d'austénite, tels que le manganèse et le nickel, tendent à abaisser les points de transformation

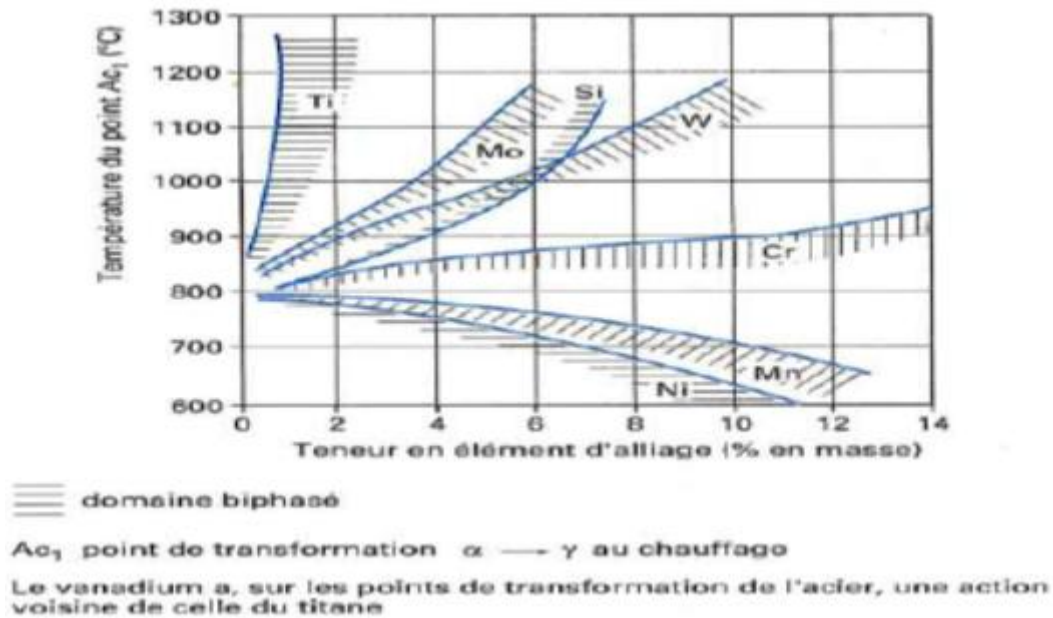


Figure 2. 2 : Influence des éléments d'alliage sur la position de Ac_1 [1]

Au cours du refroidissement, les transformations structurales sont plus complexes car il apparaît un paramètre qui ne figure pas sur le diagramme fer carbone relatif à des états d'équilibre: le temps.

L'étude de la transformation de l'austénite peut se faire:

- Soit en condition isotherme à des températures variables situées au-dessous du point A_1 ;
- Soit en condition anisotherme à des vitesses de refroidissements variables.

La première méthode aboutit au tracé des diagrammes température-temps-transformation (courbes TTT), la seconde au tracé des diagrammes de transformation en refroidissement continu (courbes TRC).

La représentation du diagramme TTT convient bien pour la définition des différents constituants obtenus suivant la température de maintien après chauffage à une température donnée.

Ce type de courbe est absolument nécessaire si on veut faire des traitements par étage dans le domaine de stabilité de l'austénite ou des trempes bainitiques.

Exemple : figure 2. 4 (Courbe TTT pour X153CrMoV12).

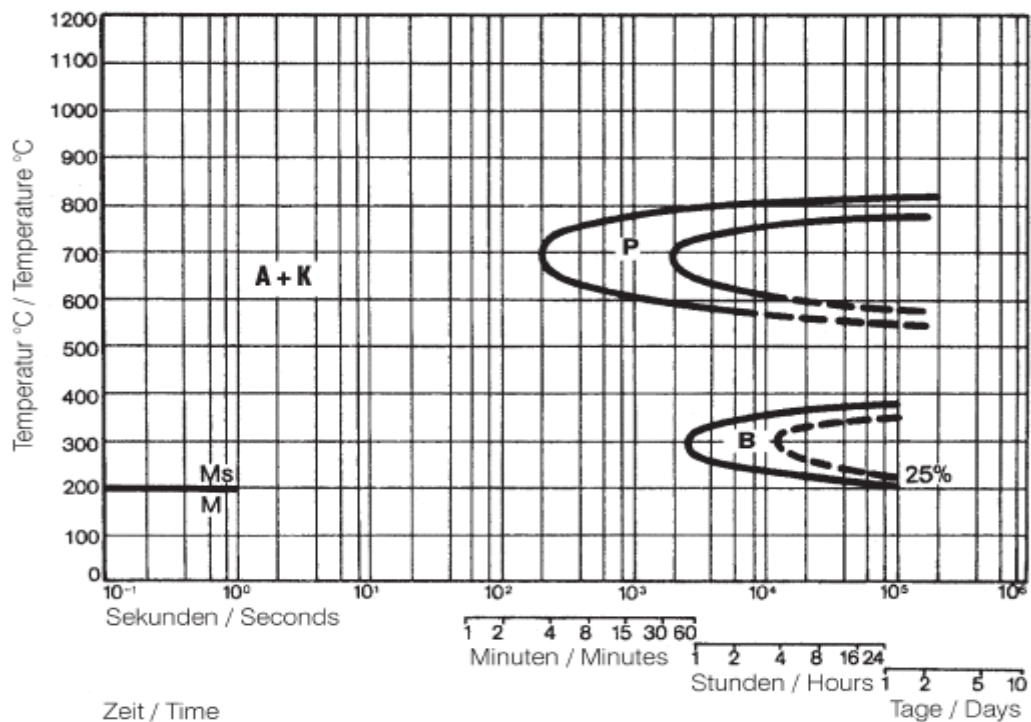


figure 2. 4 (Courbe TTT pour X153CrMoV12) [14]

On remarque que la transformation ne commence qu'après d'assez longs délais, ce qui autorise, pour la trempe, des refroidissements lents.

On note, d'autre part, la grande stabilité de l'austénite dans la zone 400-500°C, ce qui ouvre toutes les possibilités de trempe interrompue.

La teneur en carbone influe assez nettement sur la forme des courbes TTT ; c'est ainsi que selon le caractère hypo ou hypereutectoïde de l'acier, le domaine de formation de la perlite est précédé par un domaine correspondant à l'apparition de précipités de ferrite ou de cémentite ; d'autre part, la teneur en carbone joue également sur la position du point M_s , une augmentation de cette teneur se traduisant par un abaissement de M_s .

Suivant la vitesse de refroidissement, la transformation de l'austénite s'effectue d'une manière plus ou moins complète ; il peut donc subsister dans la structure de l'acier une fraction d'austénite.

Contrairement à ce qui se passe avec la perlite et la bainite, la transformation martensitique se déclenche aux plus basses températures et précisément à partir d'un point dit M_s .

2.3.1 Nature des carbures primaires

Lorsque l'on élève la température de chauffage d'un acier à outils, les carbures que l'on rencontre à l'état recuit commencent à passer en solution. Les carbures M_3C et $M_{23}C_6$, contenant du chrome, du molybdène en plus du fer, commencent à se dissoudre dès 800°C pour M_3C , 900°C pour $M_{23}C_6$ et on ne les rencontre plus au-delà de 1130°C. Les carbures complexes du type M_6C ou MC , par contre, sont beaucoup plus résistants et ne sont que partiellement remis en solution ; les dissolutions importantes de ces deux dernières phases ne commencent que vers 1150°C pour M_6C et 1200°C pour MC .

Dans Les aciers à outils à hautes teneurs en chrome et en carbone, la quantité de carbures M_7C_3 qui subsiste après chauffage aux environs de 1000° C est comprise entre 10 et 15% pour les aciers à 12% de chrome et entre 4 et 5% pour les aciers à 5% de chrome. [1]

Le tableau 2. 1, donne à titre indicatif, pour un certain nombre d'aciers d'outillage à teneur croissante en chrome et d'aciers rapides à teneur croissante en vanadium, avec ou sans addition de cobalt, la quantité totale de carbures non dissous après austénitisation, la nature et la composition chimique de ces carbures .

Tableau 2. 1 : Caractéristiques des carbures primaires pouvant être présents dans les aciers à outils Après austénitisation [1]

Tableau 2 Caractéristiques des carbures primaires pouvant être présents dans les aciers à outils après austénitisation												
Type d'acier	Température d'austénitisation (°C)	Taux de carbure non dissous (%)	Type de carbure et proportion trouvée	Composition chimique des carbures (% en masse)								
				C	Fe	W	Mo	V	Cr	Co	Si	
85 CrMoV 7 (1).....	830	6,0	MC 100 %	6,7	76,1	...	1,1	1,3	12,3	...	2,5	
X 100 CrMoV 5	950	4,5	M_7C_3 100 %	8,5	50,0	...	4,9	4,8	31,9	...		
X 160 CrMoV 12	1 025	12,5	M_7C_3 100 %	8,7	35,5	...	4,2	4,5	46,9	...		
X 100 CrMo 17	1 020	11,4	M_7C_3 100 %	8,8	40,6	...	1,6	...	49,0	...		
HS 6-5-2	1 220	10,2	MC 9,3 %	11,5	6,9	14,6	13,0	50,1	3,7	0,2		
			M_6C 90,7 %	1,8	28,6	35,0	25,6	5,8	3,0	0,2		
HS 6-5-4	1 220	10,5	MC 56,3 %	10,7	1,5	19,0	17,2	47,8	3,8	0,1		
			M_6C 43,7 %	1,8	28,3	35,0	25,3	6,2	3,3	0,1		
HS 12-1-5-5	1 220	13,9	MC 60,4 %	9,4	1,0	35,4	1,9	48,4	3,7	0,2		
			M_6C 39,6 %	1,5	22,8	60,9	3,4	5,4	4,0	2,0		

(1) Nuance non normalisée, dérivée de 100 Cr 6

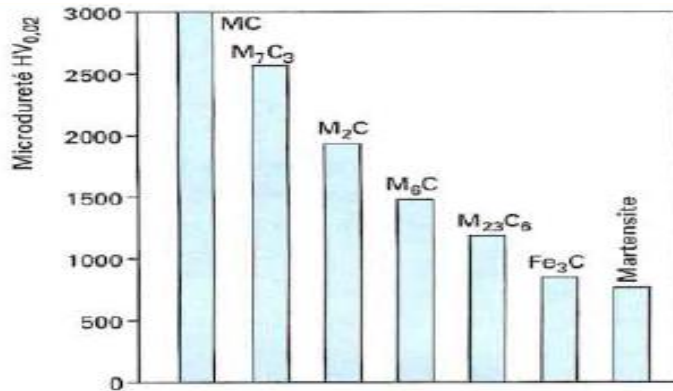


Figure 14 – Microduretés comparées des carbures contenus dans les aciers à outils

!

Figure 2. 3 : Microduretés comparées des carbures contenus dans les aciers à outils [1]

2.3.2 Grosseur de grain

La grosseur de grain austénitique est une des caractéristiques importantes des aciers à outils, cette taille est fonction de divers facteurs métallurgiques qui sont :

- La température d'austénitisation ;
- Le temps de maintien à cette température ;
- La composition chimique de l'acier ;
- La distribution des carbures primaires.

Etant donné que la grosseur de grain est étroitement liée à la ténacité (un grain fin étant favorable), certains éléments gênent le grossissement de grain, améliorent donc la ténacité par formation de carbures insolubles, assez finement répartis.

Ces carbures constituent des barrières pour le déplacement des joints de grains ; le grossissement du grain devient possible que dans la mesure où ces carbures sont dissous. Toutefois, il est à noter que cette dissolution des carbures est souvent recherchée (amélioration de la trempabilité et de la résistance au revenu) aussi, faut-il trouver un compromis entre ces diverses exigences.

D'une manière générale, les aciers à outils à haute teneur en carbone ($C > 0.6\%$) et éléments carburigènes, conservent une taille de grains relativement fine jusqu'à des températures assez élevées (de l'ordre de 1200°C) en raison de l'effet de barrière constitué par des carbures non dissous.

Plus les carbures sont fin et bien répartis, plus grande est la possibilité d'avoir un grain fin jusqu'aux températures d'austénitisation les plus élevées.

Par contre ; s'il y a des ségrégations marquées de carbures, il y a des hétérogénéités importantes de grosseur de grain.

2.4 Recuit des aciers à outils de travail à froid

Le but du recuit des aciers à outils est de mettre le métal dans un état d'adoucissement dans lequel sont effacées les traces laissées par les diverses manipulations subies antérieurement, telles que les contraintes mécaniques consécutives à des déformation à chaud ou à froid ou à l'usinage, ou pour remédier à une répartition grossière des phases ou des réseaux de carbures indésirables risquant de porter des préjudices aux traitement ultérieurs.

Deux types de recuit peuvent être envisagés, recuit complet et recuit de détente [18]

2.4.1 Recuit complet

Permet de régénérer la structure et d'adoucir l'acier dans les conditions les plus favorables pour faciliter l'usinage.

Il comporte un chauffage au-dessus du point de transformation, $\alpha \longrightarrow \gamma$ sans trop dépasser celui-ci, un maintien assez long à cette température pour réaliser l'équilibre de structure, puis un refroidissement très lent qui permette la décomposition de l'austénite aux températures supérieures, conduisant à un carbure globularisée dans une masse ferritique. L'adoucissement est d'autant plus grand que la vitesse de refroidissement est plus faible.

La vitesse de refroidissement doit donc être choisie en fonction du résultat visé, compte tenu de la composition de l'acier, mais elle ne doit jamais dépasser 25°C par heure jusqu'à 550°C, elle peut être accéléré ensuite lorsque la transformation $\gamma \longrightarrow \alpha$ est terminée.

2.4.2 Recuit de détente

Vise surtout à faire disparaître les contraintes résiduelles, conséquences de transformations mécaniques ou d'usinage.

Ce recuit se fait à une température inférieure au point de la transformation AC_1 (600°C - 700°C) et un refroidissement approprié, généralement lent pour éviter d'introduire de nouvelles contraintes, notamment dans les outils de forme irrégulier.

2.4.3 Structure à l'état recuit

Après refroidissement lent d'une structure brute de coulée ou transformation à chaud des lingots qui se traduit, dans les cas des aciers lédeburitiques, par une déformation du réseau de carbures eutectiques et par formation d'amas de plus en plus envergure, les produits subissent un traitement de recuit.

Dans un tel état, la structure des aciers à outils est constituée par un agrégat de ferrite et de carbures. Les carbures présents dans les aciers à outils à l'état recuit dépendent de la teneur en éléments d'alliage de ces derniers.

2.5 Trempe des aciers à outils

Autre fois, le mot "trempe" évoquait l'idée d'un refroidissement brusque, on sait maintenant que la valeur - vitesse critique de trempe - diffère suivant les aciers et dépend de la stabilité de l'austénite, déterminée par la composition de l'acier. Plus la stabilité de l'austénite est grande, plus la vitesse critique de trempe est faible, et que certains aciers deviennent martensitiques, après un refroidissement à l'air pourvu que les dimensions de la pièce ne soient pas exagérée

La trempe des aciers consiste en un chauffage dans le domaine austénitique permettant d'obtenir une répartition homogène des carbures dans l'austénite, suivi d'un refroidissement suffisamment rapide pour que la structure finale obtenue soit martensitique. Ce traitement amène l'acier à un haut niveau de dureté. [8]

Parmi les milieux de refroidissement qu'on rencontre, on peut citer : l'eau salée, l'eau, l'huile, l'air, le plomb ou le bain de sel.

Pour les aciers alliés, caractérisés à la trempe par une stabilité élevée de l'austénite surfusionnée, on emploie, l'huile minérale, comme agent de trempe, l'huile présente certains avantages : faible vitesse de refroidissement dans l'intervalle de température martensitique, qui diminue le danger des défauts de trempe, sévérité de trempe constante dans une large plage de température du milieu (20 à 150°C). La différence entre les propriétés de la surface et de l'âme d'une pièce dans le cas d'une trempe à l'huile est plus petite que lors du refroidissement dans l'eau. Parmi les inconvénients il y a l'inflammabilité.

2.5.1 Trempabilité

Ces divers éléments employés en combinaison de deux, trois si non plus, renforcent l'action de chacun d'eux afin d'améliorer la trempabilité.

La trempabilité de l'acier est son aptitude à subir la transformation martensitique lors de la trempe.

Dans le cas des aciers à outils, la trempabilité peut se définir par la possibilité d'obtenir un niveau de dureté donné à un endroit précis de l'outil en se fixant les paramètres suivants : [18]

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

Le milieu de refroidissement, en particulier, a une efficacité qui dépend, pour une température donnée, de sa conductivité thermique, de sa capacité thermique, de sa viscosité et du mode d'agitation. La sévérité de ce milieu peut se caractériser par une échelle de valeurs H comprise entre 0.02 pour la trempe à l'air calme et 2.0 pour la trempe à l'eau salée.

Il faut rappeler qu'il existe deux notions bien distinctes au niveau de l'obtention de la dureté après traitement thermique de trempe dans le cas des aciers à outils :

- L'intensité de durcissement, qui dépend essentiellement de la quantité de carbone mise en solution solide dans l'austénite avant 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.

2.5.1.1 Influence des éléments d'alliages sur la trempabilité

La trempabilité est directement liée à la vitesse critique de trempe : plus cette vitesse est faible, plus la trempabilité est élevée.

En règle générale, tous les éléments d'addition, à l'exception du cobalt, retardent le début des transformations perlitique et bainitique, améliorant la stabilité de l'austénite surfusionnée, c'est à dire sur la courbe TTT déplacent à droite, dans le sens d'une plus grande durée de séjour, les courbes du début et de la fin de la décomposition (solution austénitique plus stable, l'acier sera plus trempant)

Il en est de même pour la courbe TRC qui se verra repoussée vers des refroidissements lents ou des températures plus basses.

2.5.1.2 Cas des aciers à outils alliés trempant

Pour cette catégorie d'aciers, la courbe jominy classique s'avère insuffisante du point de vue dimensionnel et il est nécessaire de caractériser la trempabilité par des moyens plus performants.

L'essai le plus complet dans ce domaine consiste à associer les critères de dureté et de structure pour chaque vitesse de refroidissement et pour cela à utiliser les courbes TRC.

Une modification de la présentation de ces courbes fait intervenir le temps (durée de refroidissement entre 700 et 300°C).

Nous avons choisi de faire référence à la durée de refroidissement entre 700 et 300°C, car les mécanismes de transformation qui font intervenir des processus de germination et croissance, et par suite le temps, sont susceptibles de se produire, dans les conditions habituelles de traitement thermique des aciers, entre A_{c1} et M_s donc entre 700°C, température légèrement inférieure à celle des points A_{c1} de nombreux aciers, et 300°C, température proche des points M_s des aciers.

2.5.2 Description de la transformation martensitique

Cette transformation a lieu seulement lorsqu'un refroidissement rapide produit la surfusion de l'austénite jusqu'à des basses températures qui rendent impossible la diffusion. Le processus marche donc sans diffusion. Dans laquelle le carbone, initialement en solution solide dans l'austénite, reste confiné. Les atomes du carbone occupent les interstices octaédriques et produisent une forte distorsion du réseau.

Pour assurer la marche de cette transformation, un acier doit être refroidi d'une façon contenue au-dessous de M_s . une interruption dans le refroidissement met pratiquement fin à la transformation martensitique. Ce trait particulier distingue nettement la transformation martensitique de la diffusion perlitique qui se produit du début à la fin dans les conditions isothermiques à une température inférieure au point A_1 .

2.5.2.1 Caractéristiques générales

La transformation s'amorce dès la température M_s et se déroule non pas dans des conditions isothermes, mais dans un intervalle de température, et ne s'arrête qu'à des valeurs M_f inférieures à 20°C.

En pratique et à la fin de la réaction, il subsiste toujours une faible proportion d'austénite non transformée, c'est à dire de l'austénite résiduelle.

La position des points M_s et M_f ne dépend pas de la vitesse du refroidissement, elle est conditionnée par la composition chimique de l'austénite.

La température des points M_s et M_f est d'autant plus basse que la teneur de l'austénite en carbone est plus élevée

2.5.2.2 L'influence des éléments d'addition

Tous les éléments d'alliage, sauf le cobalt et l'aluminium, baissent les points M_s et M_f (figure 2. 10 b).

L'effet relatif des éléments d'addition peut être donné par la relation empirique
 $M_s (^{\circ}C) = 539 - 423 (\%C) - 30.4 (\%Mn) - 17.7 (\%Ni) - 12.1 (\%Cr) - 7.5 (\%Mo)$
(Formule d'Andrews) [28]

2.5.2.3 Quantité présente de l'austénite résiduelle après trempe

Dans le cas des aciers à outils, la transformation martensitique ne se produit pas jusqu'à la fin, il subsiste après trempe une quantité non négligeable d'austénite résiduelle (Voir figure 2.4), qui joue un rôle important au niveau des propriétés d'emploi : [5]

- Difficulté d'obtention de la dureté.
- Transformation en martensite secondaire par écrouissage.
- Déformation au traitement, etc...

La quantité d'austénite résiduelle, dépend de trois facteurs dans la plus part des aciers à outils.

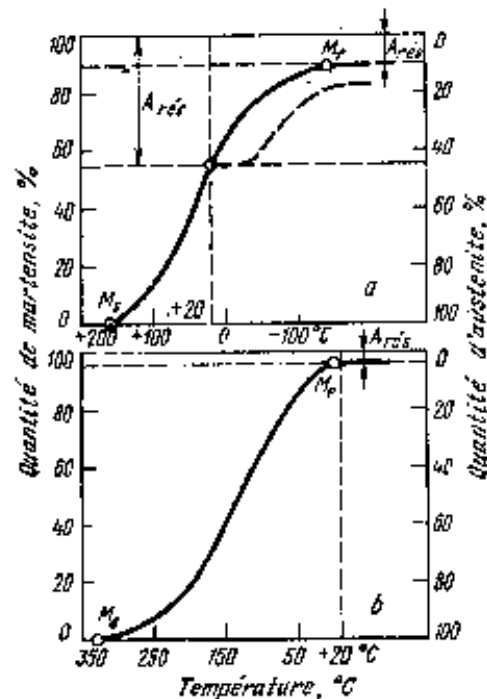


Figure 2. 4: Courbes martensitiques pour les aciers à haut carbone (a) et à carbone moyen (b) ($A_{rés}$: austénite résiduelle ; la martensite de la courbe en pointille est celle d'après la stabilisation de l'austénite) [5]

a) La température d'austénitisation

Nous indiquons sur la (figure 2. 5) l'influence de la température d'austénitisation sur le taux d'austénite résiduelle de quelques aciers d'outillage à froid alliés.

Les courbes de la figure 2. 12, représentent l'évolution du taux d'austénite résiduelle en fonction de la température de trempe pour les nuances d'aciers les plus caractéristiques. L'augmentation du taux d'austénite résiduelle après trempe est sensible pour les aciers à forte teneur en chrome au delà de 950°C.

L'élévation de cette température (température d'austénitisation) provoque un fort abaissement du début de la transformation martensitique (M_s) qui passe pour l'acier Z200C12 de 184°C pour une température de 970°C à 70°C pour une température à 1050°C, dans ces conditions, la quantité d'austénite résiduelle à la température ambiante passe de 10 à 65%.

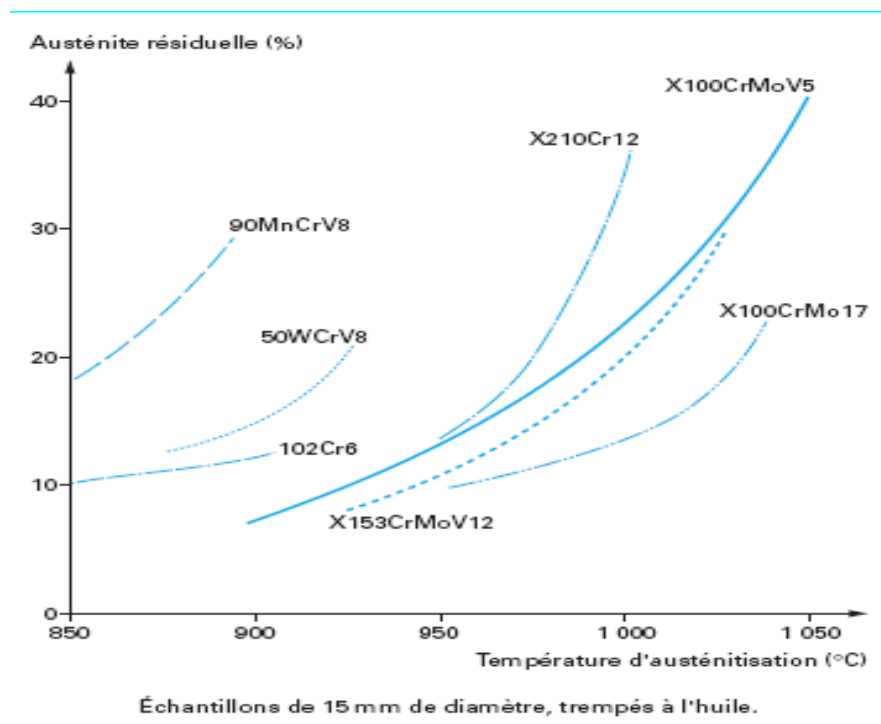


Figure 2.5 : Influence de la température d'austénitisation sur le taux d'austénite résiduelle de quelques aciers d'outillage à froid alliés [18]

b) La composition chimique

La quantité d'austénite est d'autant plus grande que les points M_s et M_f se trouvent plus bas, c'est à dire que la teneur de l'austénite en carbone et en éléments d'alliage est plus grande.

c) La vitesse de refroidissement

Pour un acier donné et des conditions d'austénitisation données, le pourcentage d'austénite résiduelle varie suivant la vitesse de refroidissement et passe par un maximum pour la vitesse critique de trempe martensitique. Si la température M_f est inférieure à la température ambiante, un maintien à 20°C ou au-dessus entraîne une stabilisation de l'austénite résiduelle et c'est la raison pour la quelle il est nécessaire de faire le traitement de revenu immédiatement après la trempe. [14]

2.5.3.1 Transformation de l'austénite résiduelle pendant de revenu

Pendant l'opération de revenu, les modifications de structures sont importantes et dépendent fortement de la nuance et des conditions de traitement antérieur. [26]

De ce fait l'austénite résiduelle subit au refroidissement qui suit le revenu une transformation martensitique qui fragilise l'acier ; un second revenu est donc nécessaire pour détendre cette nouvelle martensite fragile.

Précisons que l'austénite peut se transformer en bainite vers 300°C dans l'acier (X153CrMoV12)

2.5.4 Traitement par le froid

Ce traitement peut être effectué sur les outils en aciers relativement alliés à haute teneur en carbone, à très hauts niveau de dureté (> 60HRC) caractérisés par un point $M_s \leq 200^\circ\text{C}$ (point de transformation en martensite), qui subissent des revenus à des températures n'excédant pas 200°C, correspondant seulement à un détensionnement des contraintes de trempe. La température optimale de réfrigération est variable suivant la nature de l'acier, et est le plus souvent comprise entre - 60 et -100°C.

2.6 Structures de revenu

La structure à l'état brute de trempe d'un acier se compose de martensite et d'austénite résiduelle qui sont des phases hors d'équilibre, avec en plus ; dans les aciers les plus alliés des carbures non dissous. La martensite est une phase très dure, mais très fragile aussi. Pour ces raisons, le traitement d'austénitisation suivi d'une trempe est généralement prolongé par un revenu. Cela consiste à chauffer l'acier à une température variable, mais inférieure à la température A_{c1} , pendant un temps plus au moins important. Par ce traitement, la matrice martensitique, qui présente une structure de solution solide sursaturée, rejette le carbone sous

forme de très fins carbures. La structure finale sera donc une phase carbure finement dispersée dans une matrice ferritique qui garde certains traits structuraux similaires à la matrice originale (martensite). A cela s'ajoute la décomposition de l'austénite résiduelle en phases plus proches d'équilibre à savoir = la bainite. [19]

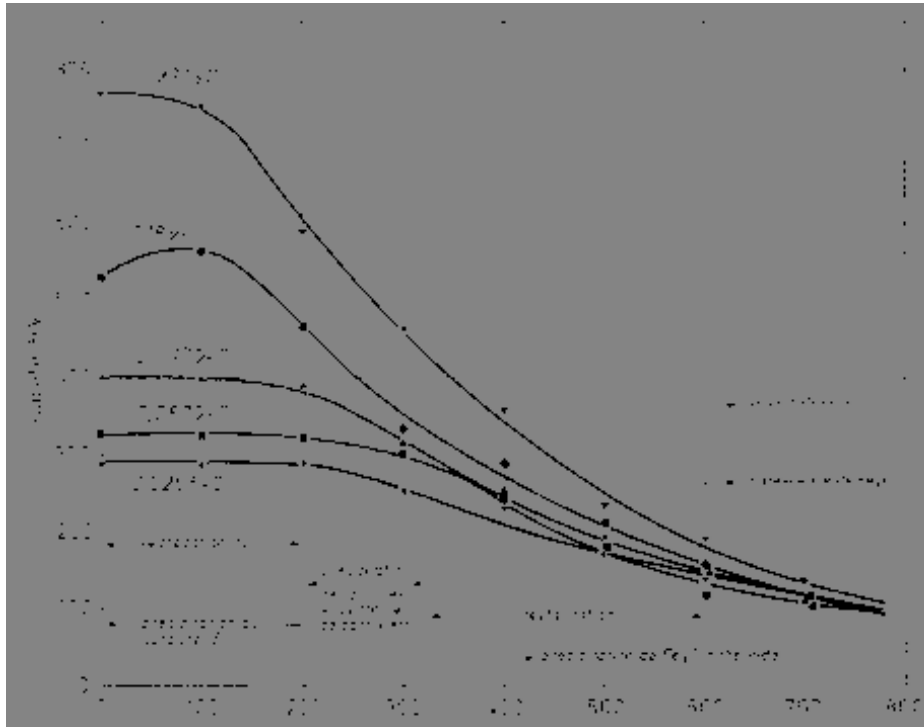


Figure 2. 6 : variations de la dureté en fonction de la température de revenu (1heure) d'alliage Fer Carbone Martensitique [20]

Avant de traiter le comportement au revenu des aciers alliés, nous donnons une brève description des aciers au carbone soumis à ce traitement. Par chauffage d'une structure trempée, le processus du revenu se fait en quatre étapes distinctes suivant la température ; ainsi schématisées par la figure 2. 6 [20]

Etape1 ; décomposition de la martensite (première transformation de revenu).

Aux températures inférieures à 150°C, caractérisée par la précipitation de fins carbures ferreux " ϵ " et la perte partielle de la forme tétragonale de la martensite.

Etape2 ; le deuxième stade de la décomposition martensitique se produit entre 150 et 350°C, la forme des carbures " ϵ " est progressivement remplacée par la cémentite, et la martensite perd la totalité de sa tétragonalité , et la structure apparue s'appelle : martensite de revenu .

Etape3 ; entre 200 et 300° C, ou le phénomène de décomposition de l'austénite résiduelle prédomine, donnant lieu à une ferrite bainitique et de la cémentite.

Etape4 ; supérieure à 350°C et caractérisée par la coalescence et la tendance à la sphéroidisation de la cémentite, ainsi que la recristallisation de la ferrite.

La teneur en carbone de la martensite de revenu est déterminée par la température et la durée de chauffage. (Voir figure 2. 7). [5]

Plus la température de revenu est élevée, plus la teneur en carbone de la solution solide (martensite) est petite (Voir figure 2. 7 a).

Avec l'augmentation du séjour à ces températures, on constate d'abord une précipitation intense du carbone, puis ce processus ralentit et en pratique cesse complètement lorsque la durée du séjour devient importante (Voir figure 2. 7, b).

L'évolution de la dureté pendant le revenu est fonction aussi du taux du carbone, tel que montrée par la figure 2. 7 pour des aciers jusqu'à 0.4%C. au-delà de cette concentration, des augmentations de dureté ont été observées dans l'intervalle de températures 50 -150°C et s'expliquent par la précipitation des carbures " ε". Par contre la tendance générale est à l'adoucissement pour des températures de revenu plus élevées.

Nous allons montrer l'effet des éléments d'addition sur le comportement de la martensite au revenu. Ceux-ci ont, en effet, une influence non seulement sur cinétique des réactions classiques, mais aussi sur les nouvelles phases qui en résultent. Certaines peuvent disparaître au profit d'autres, comme c'est le cas de la cémentite qui peut être remplacée par d'autres carbures alliés.

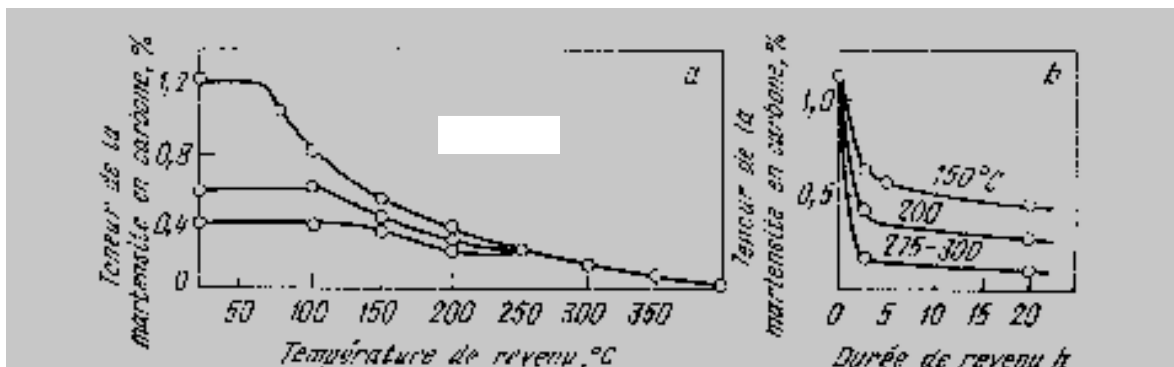


Figure 2. 7: Teneur en carbone de la martensite :

a-en fonction de la température de revenu (acier à 0.4 ; 0.6 et 1.2 % C); tre
 b-en Fonction de la durée du revenu (acier à 1.2 % C) [5] de

- carbure entre 80 et 200°C,
- cémentite entre 300 et 500°C (ou carbure M_3C),

- carbure M_7C_3 à partir de 450°C . [14]

C'est l'échange du carbone entre la cémentite et le carbure M_7C_3 qui contribue au retard à l'adoucissement ou au durcissement secondaire. L'amplitude de ce phénomène dépend, d'une part de la température d'austénitisation qui conditionne la mise en solution du carbone et des éléments d'alliage, d'autre part de la composition chimique de l'acier. Ces résultats sont illustrés par la courbe de la figure 2. 8 relatives à l'acier

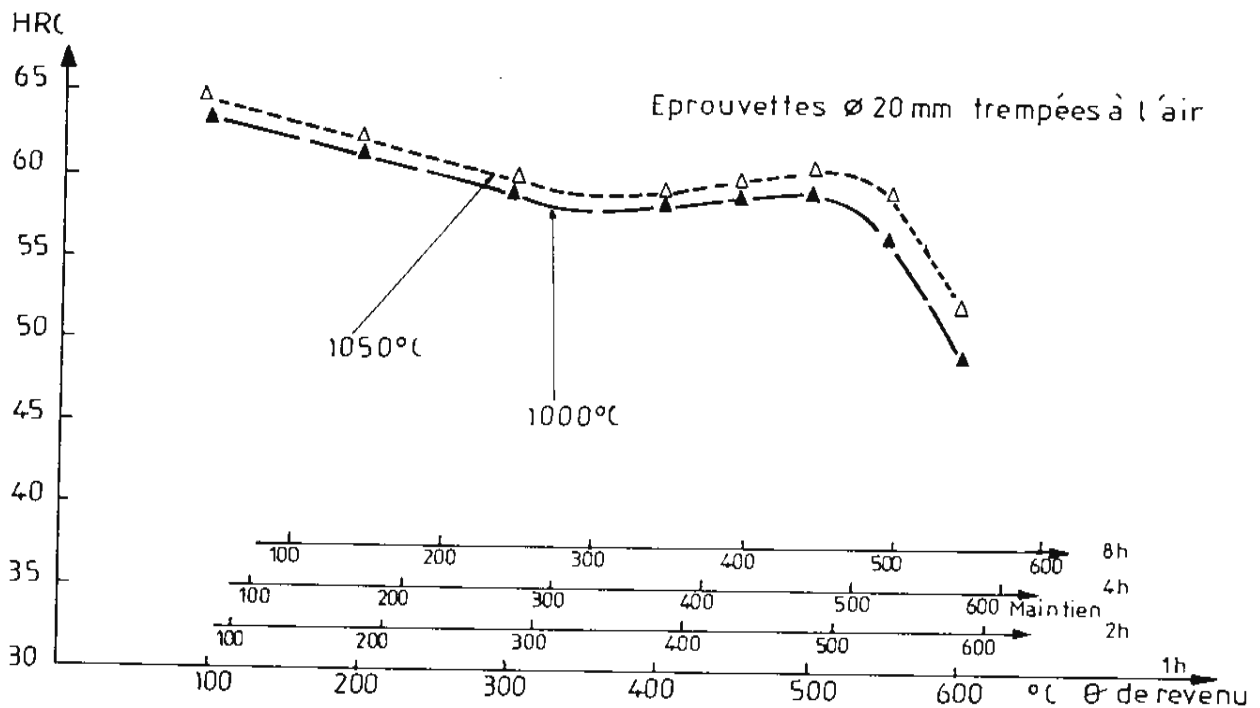


Figure 2.8: Evolution de la dureté HRC an fonction de la température de revenu [14]

2.6.1 Influence des éléments d'addition sur les carbures de fer [20]

Jusqu'à une température de l'ordre de 450 à 500°C , les phénomènes sont à peu près les mêmes que ceux que l'on observe pour les aciers au carbone = toute fois, il pourra y avoir, à partir d'une température de l'ordre de 200 à 250°C un certain retard à l'adoucissement au revenu, avec la plus part des éléments d'alliage, par rapport à des aciers au carbone ayant les mêmes teneurs en carbone, par suite du durcissement en solution solide ou du retard à l'évolution de la cémentite dus à la présence de ces éléments. On pourra donc, là encore parler de premiers, deuxièmes et troisièmes stades du revenu.

Une attention, particulière doit être apportée au cas du Si, stabilise le carbure de fer " ϵ " jus qu'a des températures de 400°C, et même au-delà, ce qui signifie aussi que la transformation du carbure" ϵ " vers la cémentite est considérablement retardé.

Pour les aciers contenant des éléments d'alliage qui ont tendance à donner des carbures, tels que : Ti, Nb, V, Mo, W, Cr,...les phénomènes sont à peu de choses près les mêmes que ceux que l'on observe pour les aciers au carbone seulement jusqu'à une température de l'ordre de 450 à 500°C. En effet, au-delà de cette température, la diffusion des atomes du ou des éléments d'alliage présents devient possible et il y a un enrichissement progressif de la cémentite en éléments d'alliage.

La cémentite peut même être remplacée totalement par le carbone de l'élément d'alliage si celui-ci est très avide de carbone et si sa teneur est suffisante.

Aux températures de revenu élevées, entre 400 et 700°C, l'influence de ces éléments est encore plus marquante en retardant la coalescence de la cémentite. Des éléments, notamment le Si, Cr, Mo, et le W retiennent la cémentite sous sa fine structure de widmanstätten en y diffusant carrément ou par ségrégation aux interfaces cémentite – ferrite. Phénomène dont l'effet direct est d'empêcher l'adoucissement pendant les revenus aux hautes températures.

Contrairement, donc, aux aciers au carbone où la coalescence de la cémentite commence à 350-400°C, celle-ci n'est perceptible qu'à partir de 500°C -550°C pour les aciers alliés. Conclusion importante, par des revenus inférieurs à 500°C, on n'obtient que des carbures de fer (ϵ , cémentite) ; les éléments d'addition ne font que diffuser vers ces phases et former donc des solutions solides (cémentite alliée).

2.6.2 Formation des carbures alliés et durcissement secondaire

Les éléments d'alliage considérés : Cr, V, Mo, W, et Ti donnent des carbures plus stables que la cémentite.

Ces carbures sont thermodynamiquement très stables puisque leurs enthalpies de formation sont largement supérieures à celle de la cémentite.

Ils pourront donc, soit retarder la formation et l'évolution de la cémentite en freinant la diffusion du carbone et en substituant au Fe dans le réseau, soit donner des carbures alliés qui pourront se former de préférence à elle, ou encore la remplacer au cours du revenu.

Deux types fondamentaux de modes de transformation des carbures ont été observés :
a) transformation (in situ): les particules de cémentite se transforment directement en groupes de particules de carbures alliés, par germination de celles-ci à l'interface ferrite - cémentite et

croissance jusqu' à disparition de la cémentite. On observe alors des groupes de particules plus fines des carbures alliés. [20]

b) Transformation par germination séparée : les particules initiales des cémentites se dissolvent dans la matrice et les carbures alliés apparaissent sur de nouveaux sites de germination, essentiellement les dislocations. Cette morphologie de précipitation est généralement plus fine, donc plus durcissante, que la précédente. Mais, fait important dans les traitements de revenu, ce processus n'est possible qu'à partir des températures de 500 - 600°C.

La formation de ces carbures au cours du revenu est particulièrement importante pour la pratique, car il y a non seulement durcissement des aciers, Mais encore, du fait de la très grande stabilité des carbures formés, la diminution des propriétés avec la température est beaucoup moins importante que pour les aciers au carbone : tous les aciers pour emplois à chaud contiendront donc des éléments d'alliages susceptibles de donner des carbures.

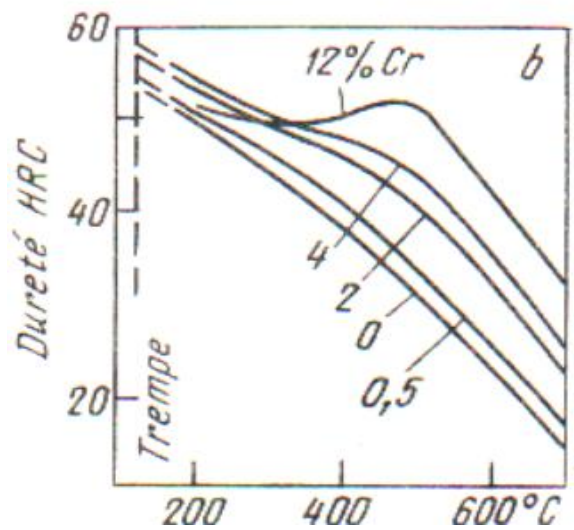
2.6.3 Revenu des aciers contenant du chrome

Dans les aciers au chrome, on rencontre deux carbures : le Cr_7C_3 , de forme trigonale, et le Cr_{23}C_6 de forme cubique complexe. Pendant le revenu, on assiste à la réaction suivante = matrice $\rightarrow (\text{Fe Cr})_3\text{C} \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{Cr}_{23}\text{C}_6$

Cette séquence n'est complète que si le taux de chrome dans l'acier dépasse 7%. A des concentrations inférieures, et même en présence d'autres éléments comme le molybdène, le Cr_{23}C_6 n'apparaît pas. Par rapport au vanadium, le chrome est moins carburigène, ce qui fait que le carbure Cr_7C_3 n'est possible que si le taux en chrome dépasse 1% pour 0.2% C.

Jusqu'à 4% de Cr, la transformation de Fe_3C en Cr_7C_3 fait par germination aux interfaces Fe_3C / ferrite. Les pics de durcissement secondaires, voir la figure (2. 18), n'apparaissent qu'à des compositions supérieures à 9% Cr et sont associés à la précipitation du Cr_7C_3 .

La diffusion relativement rapide du chrome dans la ferrite fait que le Cr_7C_3 est détectée à des températures aussi faibles que 500°C (voir figure 2. 18), et en comparaison avec le carbure de vanadium, ce carbure coalesce rapidement.



Température de revenu

Figure 2. 9 : Influence de la température de revenu pour un acier à 0.44%C, Mais pour une teneur différente de chrome [5]

Ceci se traduit, par un adoucissement au revenu entre 500 et 700°C et ce, malgré la présence d'autres éléments comme le molybdène qui peut réduire la coalescence du Cr_7C_3 . au contraire, pour en acier à 12% Cr, et pour la même température, il apparaît un durcissement secondaire associé au Cr_7C_3 et, en même temps, commence la germination du carbure Cr_{23}C_6 . La croissance du Cr_{23}C_6 se fait aux dépens de Cr_7C_3 qui peut disparaître complètement par vieillissement au revenu, la présence d'autres éléments d'addition stabilise l'un ou l'autre des deux carbures; le tungstène accélère la croissance du Cr_{23}C_6 , alors que le vanadium stabilise le carbure Cr_7C_3 . de ce dernier comportement, on préfère le vanadium pour maintenir une structure fine et dispersée en carbures Cr_7C_3 dans l'intervalle de températures 550 - 650°C. [20]

CHAPITRE 3

PROCEDURE EXPERIMENTALE

K110 (X153CrVMo12)
ACIER DE TRAVAIL À FROID
ACIER POUR OUTILS DE TRAVAIL À FROID

Introduction

L'acier X153CrVMo12 constitue de nos jours, avec ses dérivés, l'une des premières familles d'aciers à outils, à la fois par l'importance des tonnages mis en œuvre chaque année et par l'extraordinaire diversification de ses emplois.

Pourtant, malgré l'ancienneté et la grande diffusion de ces aciers, les utilisateurs rencontrent encore parfois de sérieuses difficultés dans leur mise en œuvre (notamment dans la conduite de leur traitement thermique). [1] [2]

Notre objectif était de travailler dans un atelier de découpage d'acier (barre de fer) identique à ce que nous utilisons pour créer des piliers de béton.

Mais nous n'avons pas pu le faire en pratique à cause de virus corona donc nous avons travaillé en théorie et avec des recherche bibliographique, et le travail le plus avance pour cet étude (acier X153CrVMo12) c'est le travail de Bohler [28]

3.1 Matériau

Il s'agit d'un acier normalisé de type **X153CrMoV12** destiné pour le travail à froid sa microstructure est lédéburitique, offrant la possibilité de durcissement secondaire et ce pour une grande polyvalence d'applications. Peu sujet à la distorsion, très stable à l'usure, avec une bonne ténacité. Il est très stable au revenu, même à des températures de trempe élevées et peut ainsi, bien qu'étant un alliage de travail à froid, être bien nitruré en plus, sans perte de dureté.

X153CrMoV12 offre une résistance à l'usure et une ténacité très élevées, durcit à l'air avec un faible ordre de mouvement et offre une mesure de résistance à la corrosion lorsqu'il est poli. Pour les outils fonctionnant dans des conditions d'usure et d'abrasion sévères ou comme alternative aux grades de durcissement à l'huile lorsque de longues séries sont nécessaires.

3.1.1 Etat de livraison de l'acier

L'acier est livré sous forme de barre rectangulaire, disque et barre ronde à l'état recuit où la dureté ne dépasse pas la valeur de 240HB. Cette valeur permet un usinage aisé et sans difficultés. Selon la fiche technique du fabricant, ce recuit est effectué à une température de 850°C à 960°C.

3.1.2 Composition chimique (% moyen) [28]

Les échantillons d'outils de travail à froid X153CrMoV12 ont été soumis à des tests. La composition chimique réelle de l'acier est indiquée dans le tableau 3.1.

% En masse	C%	Si%	Mn%	Cr%	Mo%	V%
Valeur mesurée	1.55	0.30	0.30	11.30	0.75	0.75

Tableau 3.1 Composition chimique (% moyen)

D'après la bibliographie et les résultats de ces analyses, nos aciers possèdent les caractéristiques indiquées par le fournisseur (BOHLER) et confirment donc que cet acier appartient à la famille des aciers à outils au chrome pour travail à froid.

Formage à chaud

Forgeage: 1050 à 850 ° C

Refroidissement lent dans un four ou un matériau thermo-isolant.

3.1.3 Caractéristiques de l'acier X153CrVMo12

Ces aciers sont très couramment désignés comme aciers indéformables.

L'acier X153CrVMo12 est utilisé à l'état trempé et revenu, caractérisé par des niveaux de dureté élevée à température ambiante (58 à 61 HRC). Mais, contrairement aux outils pour travail à chaud, leur résistance à l'adoucissement des hautes températures est relativement faible. De ce fait, leur utilisation se limite à des domaines ne nécessitant pas une exposition prolongée ou répétitive au-delà des températures de 200-260°C. [21]

Il possède une très bonne trempabilité, leur courbe de trempabilité est pratiquement horizontale ; il est dit autotrepant.

3.1.4 Microstructure de l'acier X153CrMoV12

L'acier au chrome ledéburitique X153CrMoV12 présente une résistance à l'usure abrasive élevée, en raison de sa teneur élevée en carbone et en chrome avec un grand volume de carbures dans la microstructure. Cette qualité d'acier a une résistance à la compression élevée, d'excellentes propriétés de trempabilité profonde et de ténacité, une stabilité dimensionnelle pendant le traitement thermique, une résistance élevée au ramollissement à des températures élevées. La dureté plus élevée des échantillons traités cryogéniques par rapport aux échantillons trempés conventionnels signifie une quantité plus faible d'austénite retenue que pour les échantillons trempés à température ambiante et revenus dans des conditions similaires. Dans la microstructure des échantillons, on a observé que le carbure primaire ne se dissolvait pas à 1070 ° C et que leur structure nette n'avait pas été modifiée pendant le traitement thermique. Au cours du revenu à haute température, les carbures primaires sont devenus de plus en plus arrondis. Après une faible température de revenu dans la martensite, on a également observé quelques petits carbures arrondis, augmentant la température de revenu, la quantité de carbures finement dispersés augmentait, ce qui entraînait une dureté plus élevée. Les problèmes importants dans le traitement thermique de ces aciers sont la réduction ou l'élimination de l'austénite conservée en raison du traitement cryogénique.

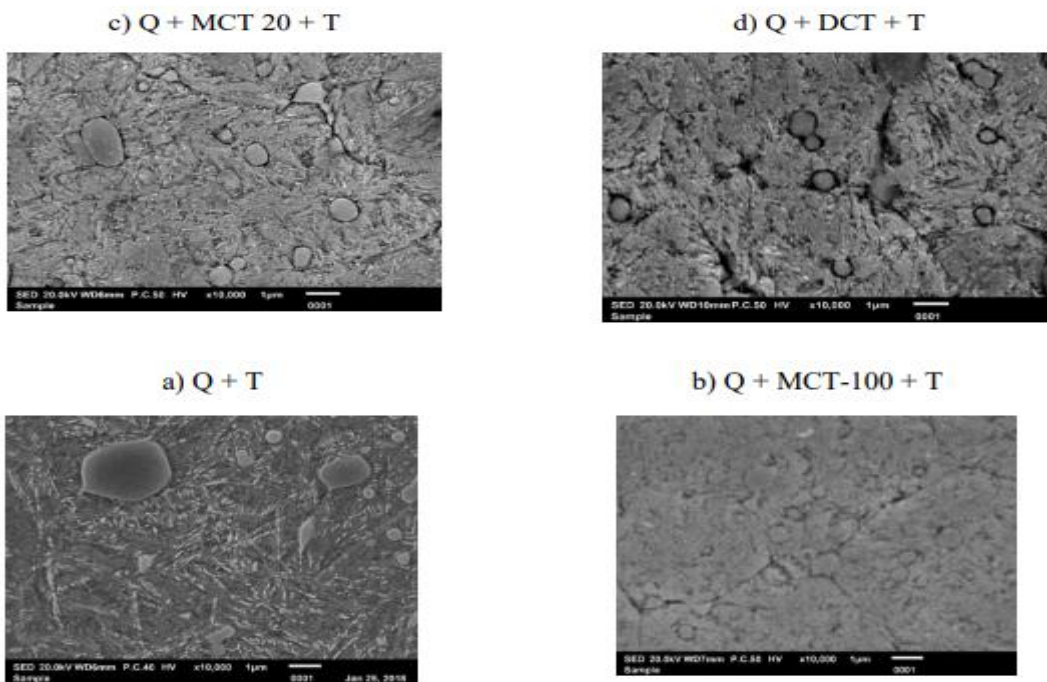


Figure3.1. Microstructure de l'acier X153CrMoV12 après divers modes de traitement thermique

3.2 Données techniques sur l'acier X153CrVMo12 [28]

L'acier, acheté à un groupe industriel spécialisé dans les aciers spéciaux (BOHLER), se ressent sous la forme de barre ronde et carrée de différentes sections.

Il est livré à l'état dit traiter. Cet état permet son utilisation directe à l'usinage.

Le traitement thermique est effectué par le fabricant selon les conditions industrielles suivantes :

- austénitisation de 800 à 850°C ;
- maintien suivant l'épaisseur ;
- refroidissement lent au four.

Ce type de traitement (recuit de coalescence) permet d'obtenir un nombre de dureté ne dépassant pas 58 - 61 HRC.

3.2.1 Utilisation

Outils de coupe à haut rendement (matrices et poinçons), découpage et outils de poinçonnage, outils de menuiserie, lames de cisaillement pour couper des matériaux de faible épaisseur, outils de filetage, outils de dessin, emboutissage profond et extrusion à froid, outils de pressage pour le industries céramiques et pharmaceutiques, roules froids (rouleaux de travail) pour supports à rouleaux multiples, mesure instruments et jauges, petits moules pour les plastiques ,industrie où une excellente résistance à l'usure est obligatoire.

3.3 Protocole de travail

En a besoin d'un :

- Four des traitements thermique
- D'uromètre pour les essais de dureté
- Microscope optique
- Polisseuse a deux disques de marque
- Attaque chimique
- Le microdromètre

Afin de facilite la continuation de ce travail, nous proposant un protocole d'expérience qui passera en reverra les propriété mécanique de l'acier k110 (X153CrMoV12) en fonction de traitement thermique qu'il recevra :

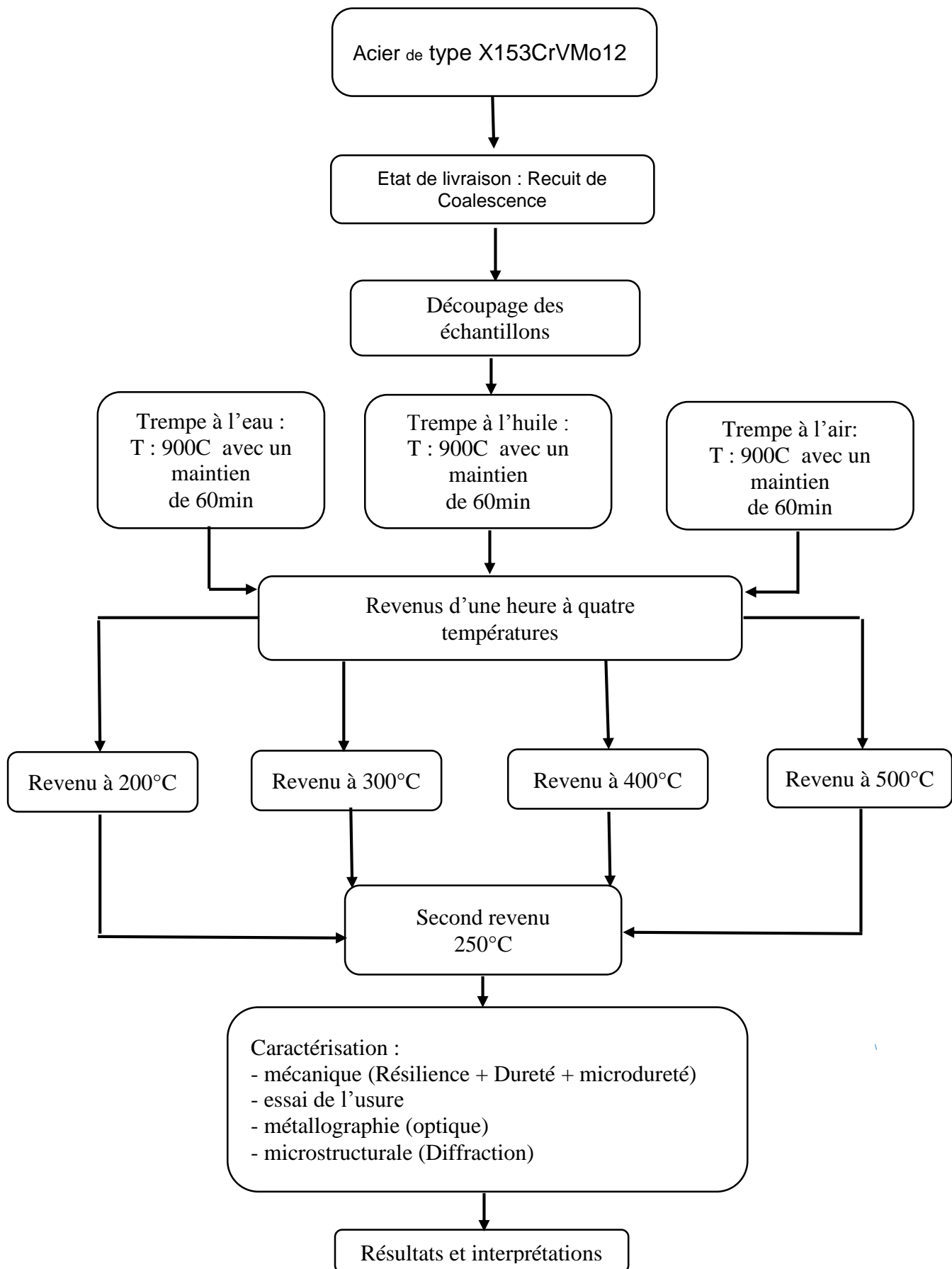


Figure 3.2 : Représentation schématique du processus expérimental

3.4 La dureté

Les résultats des essais de dureté HRC sont rassemblés dans le tableau 3.3, qui sont aussi représentés sur la figure 3.1.

Tableau.

Tableau 3.2 : Résultats des essais de dureté HRC selon les différents traitements

	Dureté de l'acier X153CrMoV12, HRC
trempe	900 °C
revenu	
Sans revenu	61
200	58
300	57
400	55
500	53

Variation de dureté

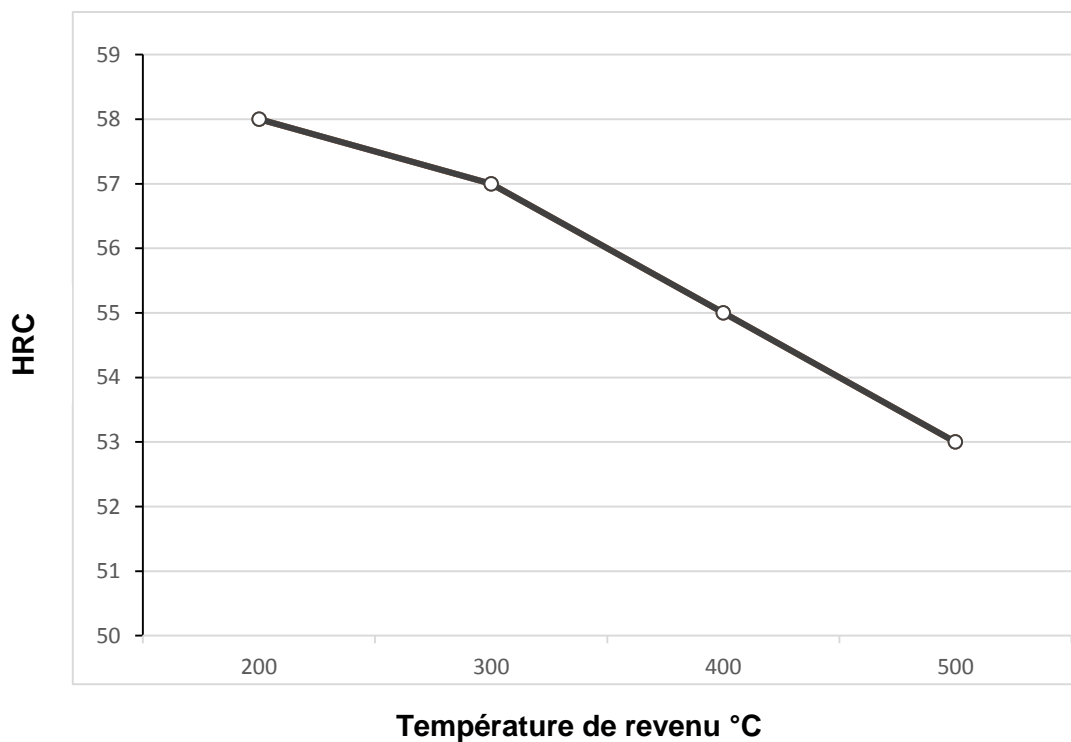


Figure 3.3 : Evolution de la dureté selon les différents traitements de revenu

Conclusion générale

L'usure par frottement abrasive au cours des opérations de mise en forme est un mal inévitable pour les outils de coupe à froid qui sont en contact directe avec les matériaux à maitre en œuvre (tôles de différentes épaisseurs). Cela pose non seulement des problèmes d'usure avec le temps, mais des ruptures par effritement et /ou écaillage des arrêtes de coupe du système « pinceau - matrices ». La détérioration prématurée de ces pièces cause des arrêts techniques prolongés et engendre des pertes économiques pour les ateliers de travail des matériaux en tôles.

Ce problème est posé par un atelier spécialisé dans le découpage d'acier de barre de fer Le matériau de base utilisé pour la mise au point des outils de coupe au niveau de cette atelier est l'acier X153CrMoV12, matériau largement utilisé pour le travail à froid

L'étude qu'on a effectuée a comme objectif la recherche des conditions de traitements thermiques optimales permettant d'obtenir un acier ayant un bon compromis entre la résistance à l'usure et ténacité.

Pour réaliser l'étude proprement dite nous avons préparé une quantité suffisante d'échantillon (par découpe, usinage, polissage) avec quoi on a appliqué un traitement thermiques à savoir :

- Un cycle pour le traitement de trempe à de la température 900°C,
- Une première série de revenu à différente températures
- Un deuxième revenu sur les mêmes échantillons déjà revenu

Les essais de caractérisation ont été réalisés suivant les étapes suivantes:

1. Choix de la température d'austénitisation permettant d'obtenir la dureté la plus élevée
2. Après le double revenu on a réalisé un test d'usure sur les échantillons ayant donnée de bonne valeur de dureté
3. Caractérisation métallographique au microscope optique
4. Observation au microscope de l'échantillon ayant donné de meilleures propriétés d'usure et de dureté

REFERENCES

- [1]. ROBERT LEVEQUE - Aciers à outils - M330 Techniques de l'ingénieur 1979.
- [2]. SIMONE PARENT-SIMONIN – les alliages Fer, Carbone, Chrome et Leurs dérivés- Centre Technique Des Industries de la Fonderie- 1983.
- [3]. H. ALLAIGRE -les Aciers à outils pour découpage à froid N°46 conférence prononcée à la réunion de l'association technique de traitement thermique le 9 novembre 1972 p 1-7.
- [4]. 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-étienne, 8-9 novembre 1983 p 11-54.
- [5]. I. LAKHTIN - Métallographie et traitement thermique des métaux - Edition Mir 1986.
- [6]. ROBERT LEVEQUE et CREUSOT-LOIRE - les aciers à outils indéformables- revue Aciers spéciaux N°37 Mars 1987 p 18-29.
- [7]. F.CONVERT, F.LECRDISEY et A.PAILLEUX –Guide des Aciers à outils pour travail à froid sur presse. Volume 1 1978.
- [8]. I. COLOMBIER - Les aciers à outils et leur traitement thermique - PYC Edition Paris 1971.
- [9]. R.LEVEQUE G.BAUBIAT et J.C.POITTE - Aciers à outils utilisées dans le découpage des tôles - Aciers spéciaux N°57 Février 1982 p 8-13.
- [10]. J. F. DELORME et D. ROUSSEAU. –Possibilités actuelles d'évolution des aciers du type Z200C12. - Colloque international sur les alliages à hautes teneurs en chrome et en carbone. Saint-étienne, 8-9 novembre 1973 p 437-472.

[11]. G.SCHREIBER, B.CHIBRIAIEV, A.POLFEROV, S.PERLINE - Matériaux de construction pour les industries du pétrole, du gaz et de la pétrochimie - Edition école supérieure de MOSCOU.

[12]. JEAN-PAUL BAILON, JEAN-MARIE DORLOT –Des Matériaux- Ecole Polytechnique de Montréal, 2000-Troisième Edition.

[13]. A. CONSTANT et G.HENRY - Les principes de base du traitement thermique des Aciers - transformation au chauffage - Revue de traitement thermique N°154 1981 p 85-90.

[14]. G.MURRY, R.LEVEQUE, M.GRAFF, R.MORTIER - Conseils pour le traitement thermique des Aciers à outils – Editeur OTUA 1982.

[15]. D.ROUSSEAU, J.F.DELORME et R.TRICOT –Mise en œuvre et propriétés d'emploi des aciers de la famille du **X153CrVMo12**- Colloque international sur les alliages à hautes teneurs en chrome et en carbone. Saint-étienne, 8-9 novembre 1973 p 343-376.

[16]. RABEY ALEXANDRE – Bases de choix des aciers à outils - Editeur OTUA 1979.

[17]. GUY MURRY –Transformation des aciers - M1115 Techniques de l'ingénieur 1980.

[18]. ROBERT LEVEQUE - Traitements Thermiques dans la masse des aciers à outils - M1134 Techniques de l'ingénieur 1993.

[19]. JOEL SAVERNA – Relation entre le traitement thermique et la résistance à l'abrasion applicable à l'acier Z30C13- Thèse de Doctorat, Université de Nancy, 1984.

[20]. A. CONSTANT et G.HENRY - Les principes de base du traitement thermique des Aciers – Transformation au revenu et évolution des propriétés mécaniques au cours du revenu - Revue de traitement thermique N°171 1983 page 52-62.

[21]. K.ABDELI Mémoire de magistère - Evolution Microstructurale et Mécanique d'un acier au chrome - Molybdène - vanadium en conditions de fatigue thermique Ecole Nationale Polytechnique, juin 2001

[22]. C.P. Tabrett, I. Sare, Ghomashchi, - microstructure property relationship in high chromium white iron alloys - , International Materials Reviews 41162C, 1996.

[23]. A.KEHAL Mémoire de magistère – Elaboration de fontes blanches à haute teneur en chrome et étude de leur résistance à l'usure, Université de Blida, Juillet 2008.

[24]. NORME INTERNATIONALE ISO 4967-1979 (F).

[25]. BENARIOUA Mémoire de magistère –Etude d'une nouvelle technique de titanuration des aciers à outils, Ecole Nationale Polytechnique, Octobre 1993.

[26]. F.CONVERT, F.LECRDISEY et A.PAILLEUX- Propriétés des aciers à outils à 12 % de et comparaison avec les autres nuances utilisées en travail à froid.

[27]. Metals Handbook Edit.1989, vol. 8 – mechanical testing, p69.

[28]. K110 (**X153CrVMo12**) ACIER DE TRAVAIL À FROID ACIER POUR OUTILS DE TRAVAIL À FROID **BÖHLER K110**