

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GÉNIE MÉCANIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : GÉNIE MÉCANIQUE
OPTION : FABRICATION
MÉCANIQUE ET PRODUCTIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Hanash Mohammed

Intitulé

**Contribution au choix des matériaux des
outils coupants**

Soutenu devant le jury composé de:

Zaoui M	Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Président
Rouabhi Y	Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Encadreur
Sebhi A	Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Examineur
Arslene M	Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA	Examineur

Année universitaire : 2017 /2018

DEDICACE

Je suis très heureuse de pouvoir dédier cet humble travail aux être les plus chers à mon cœur :

Cher à mon père « M.yahya hanash », qui je voulais être présent le jour le plus important de ma vie.

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; ma chère maman

« aysha » que j'adore.

A tous les membres de ma famille ;

A vous mes adorables sœurs Aman et Eman et Boushra et Yesra ;

A mes chers frères Ebrahime et abd alrahlan et moaud.

À vous tous qui vous m'avez aidé et encouragé par vos conseils et vous m'avez offert tout pour la réussite.

A mes meilleures amies : pour m'avoir supporté durant ces cinq années d'études.

A mes camarades

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères, sœurs et des amis sur qui je peux compter.

Je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Remerciements

Tout d'abord, je remercie le Dieu, notre créateur de m'avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à mon encadreur

M^{er} : ROUABHI Youcef

D'avoir accepté de diriger ce travail aussi pour ses précieux conseils et ses encouragements.

Tous les étudiants du département de génie mécanique

A tous les enseignants du département de génie mécanique

A tous ceux nous ont apporté une aide ou une assistance durant notre travail, et notre formation tout au long du cycle

Avec l'expression de nôtres gratitudees

A tous nous disons merci !

Tables des matières

Listes des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des Notations

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : État de l'art et le but de recherche.

I. Procédés d'usinage	3
I.1. Introduction	3
I.1.1. Bref historique	4
I.2. Choix d'un procédé de fabrication	6
I.2.1. Critères de choix d'un matériau et d'un processus de fabrication	6
I.3. Importance de l'outil de coupe dans la construction des machines	8
I.3.1. Paramètres du couple outil/matière	9
I.4. Les paramètres de coupe en tournage NEC 6185	10
I.4.1. Vitesse de coupe	10
I.4.2. L'avance par tour	11
I.4.3. La profondeur de passe	11
I.5. Les outils de coupe	11
I.5.1 La géométrie de l'arête de coupe	12
I.5.2. Les angles de coupe	12
I.6. Classification des outils	14
I.7. Matériaux d'outillage et exigence principale de l'outil de coupe	15
I.8. But de travail	15

Chapitre II : Principaux matériaux des outils de coupe.

II.1 Introduction	17
II.2 Démarche du choix de l'outil coupant	18
II.3 Principaux fabricants mondiaux d'outils de coupe	19
II.4 Les principaux matériaux des outils coupants	21
II.4.1 Les aciers à outils	21
II.4.2. Les carbures métalliques	26

Tables des matières

II.4.3 Cermets (HT, HC)	32
II.4.4 Céramiques (CA, CN, CC);	34
II.4.5 Nitrure de bore cubique polycristallin.....	35
II.4.6 Diamant polycristallin PCD	36
II.5 Conditions d'utilisation des matériaux pour outils de coupe	37
II.6 Conclusion	39

Chapitre III : Procédures de fabrication des plaques de coupe.

III.1 Introduction.....	41
III.2 Procédure d'élaboration des plaques en carbure de tungstène.....	41
III.3 Structure des outils (WC-Co).....	44
III.3.1 Le métal dur fritté : Présentation figure III.6 :.....	45
III.3.2 Composition est caractéristiques	46
III.4 Processus de fabrication des plaques de coupe.....	48
III.4.1 Préparation de la poudre	49
III.4.2 Séchage-granulation.....	50
III.4.3 La mise en forme : compression et usinage à crû	50
III.4.4 Frittage d'ébauches compactées.....	52
III.5 La qualité métallurgique.....	54
III.6 Conclusion	55

Chapitre IV : Procédés d'optimisation des matériaux d'outils de coupe.

IV.1 Introduction	57
IV.2 Propriétés des aciers à outils et leurs optimisations	57
IV.2.1 La dureté	57
IV.2.2 La trempabilité	58
IV.2.3 La tenue à chaud	58
IV.2.4. La ténacité.....	58
IV.2.5 La résistance à l'usure	58
IV.2.6 La résistance aux chocs thermiques.....	58
IV.3 Composition chimique	58
IV.4 Les traitements structuraux et superficiels (traitements thermo-chimiques).....	60
IV.4.1 La nitruration.....	61
IV.4.2 Système d'implantation ionique par immersion plasma	62
IV.5 Les revêtements industriels	64
IV.5.1 Les revêtements durs en couches minces.....	67

Tables des matières

IV.5.2 Méthodes de dépôts	68
IV.5.3 Les revêtements durs à deux composés « binaires ».....	69
IV.5.4 Les revêtements durs à plusieurs composés	71
IV.5.5 Traitement cryogénique de surface	72
IV.6 Identifier et traiter les huit types d'usures de plaquettes les plus	73
IV.6.1 Introduction	73
IV.6.2 Les huit types d'usures de plaquettes les plus courantes.....	73
IV.7 Conclusion	78
Conclusion Générale	80

Bibliographie

Résumé

Listes des figures

Chapitre I : État de l'art et le but de recherche.		
N° de Figure	Titre de figure	N° de page
Fig.I.1	Évolution historique des vitesses pour l'usinage des aciers	05
Fig.I.2	Historique de l'acier au carbure de tungstène revêtu, chariotage d'un cylindre de $\varnothing 100$, longueur de 500 mm	05
Fig.I.3	Procédés mécaniques et utilisation des outillages	06
Fig.I.4	Paramètres de coupe en tournage	10
Fig.I.5	Définition de a_p et f en tournage	11
Fig.I.6	Géométrie de l'arête de coupe	12
Fig.I.7	Définition basique d'un outil de coupe de tournage	12
Fig.I.8	Angle de direction d'arête de l'outil	13
Fig.I.9	Angle d'inclinaison d'arête.	13
Fig.I.10	Arête de coupe dans le plan P_0	14
Chapitre II : Principaux matériaux des outils de coupe.		
N° de Figure	Titre de figure	N° de page
Fig.II.1	Interrelation outils/pièces	17
Fig.II.2	Matériaux pour outils de coupe	18
Fig.II.3	Évolution de la dureté en fonction de la température de revenu pour quelques nuances d'aciers à outils de travail à chaud	25
Fig.II.4	Évolution de la ténacité en fonction de la température de quelques aciers à outils	26
Fig.II.5	Alliage dur avec un revêtement	27
Fig.II.6	Type de revêtement en Titan	28
Fig.II.7	Les carbonitrides cubiques	30
Fig.II.8	Grain WC de taille moyenne à grosse	30
Fig.II.9	Grain fin et micro-grain	31

Fig.II.10	Alliages durs sans revêtement	32
Fig.II.11	Cermets (HT, HC)	32
Fig.II.12	matière cermet	33
Fig.II.13	Céramiques (CA, CN, CC)	34
Fig.II.14	Céramiques mixtes Renforcées	34
Fig.II.15	Céramiques renforcées avec des cristaux filiformes	34
Fig.II.16	Céramiques à base de nitrure de silicium	34
Fig.II.17	Présentation du CBN sur un support	35
Fig.II.18	Les nuances CBN	36
Fig.II.19	Diamant polycristallin PCD	37
Fig.II.20	Comparaison des matériaux de coupe d'après	38
Fig.II.21	Illustration des aptitudes des matériaux à outil	39
Fig.II.22	Positionnement comparative des propriétés de différents matériaux de coupe	40
Chapitre III : Procédures de fabrication des plaques de coupe.		
N° de Figure	Titre de figure	N° de page
Fig.III.1	Procédure de fabrication du carbure de tungstène	42
Fig.III.2	Résumé de la fabrication des outils en carbure de tungstène, suivi d'une préparation d'arête et d'un surfaçage	43
Fig.III.3	Comparaison des préparations d'arête et de la géométrie brise copeau sur deux plaquettes carbure	43
Fig.III.4	Familles de géométries des arêtes préparées. De gauche à droite : arête circulaire unitaire, avec $W/H=1$, suivie d'une arête à forme plate puis une arête en « chute d'eau »	44
Fig.III.5	Microstructures de plaquette carbure après frittage. Relation entre la grosseur des grain et le % de Co dans le carbure cémenté	45
Fig.III.6	Microstructure du métal dur WC/Co	45
Fig.III.7	Relation entre la dureté, le pourcentage de Co et la taille des grains de carbure	47
Fig.III.8	Relation entre la ténacité, le pourcentage de Co et la taille des grains de carbure	47

Listes des figures

Fig.III.9	Représentation du cycle de fabrication	48
Fig.III.10	Préparation de la poudre WC/Co	49
Fig.III.11	Opération de compression de la poudre WC/Co	51
Fig.III.12	frittage des plaquettes	52
Fig.III.13	Coupe du diagramme ternaire W-C-Co pour un rapport W/C constant d'après	55
Chapitre IV : Procédés d'optimisation des matériaux d'outils de coupe.		
N° de Figure	Titre de figure	N° de page
Fig. IV.1	Principe de l'implantation ionique	62
Fig. IV.2	Rôle des revêtements	64
Fig. IV.3	Évolution de la conductivité thermique en fonction de la température des constituants des outils et des revêtements	66
Fig. IV.4	L'usure en dépouille normale	74
Fig. IV.5	Arête rapportée	75
Fig. IV.6	Écaillage d'une plaquette	76
Fig. IV.7	Usure mécanique thermique	76
Fig. IV.8	Déformation de l'arête tranchante	77
Fig. IV.9	Formation d'entailles d'une plaquette	77
Fig. IV.10	Rupture mécanique d'une plaquette	78

Liste des tableaux

Chapitre II : Principaux matériaux des outils de coupe.		
N° de Tableau	Titre de Tableau	N° de page
Tableau II.1	Caractéristiques des principaux fabricants mondiaux d'outils de coupe	20
Tableau II.2	représente la désignation et la composition chimique de quelques nuances des aciers à outils de travail à chaud	25
Tableau II.3	Comparaison et emploi des différents types de matériaux pour outils en usinage	38
Chapitre III : Procédures de fabrication des plaques de coupe.		
N° de Tableau	Titre de Tableau	N° de page
Table III.1	Les caractéristiques physicochimiques des éléments du métal dur fritté	46
Chapitre IV : Procédés d'optimisation des matériaux d'outils de coupe.		
N° de Tableau	Titre de Tableau	N° de page
Tableau IV.1	Propriétés des différents outils de coupe et revêtement	65
Tableau IV.2	Comparatif des propriétés de certains revêtements	66
Tableau IV.3	Caractéristiques des différents revêtements pour outils disponibles	67

Abréviations

- U.G.V : Usinage grande vitesse.
- ISO : Organisation internationale de normalisation.
- CVD : Chemical Vapor Deposition.
- PVD : Physical Vapor Deposition.
- MMC : les matières composites à matrice métalliques.
- CFRP : les plastiques renforcés à la fibre de carbone.
- CAO : conception assistée par ordinateur.
- MPE : mélange prêt à l'emploi.
- MTVD : Medium Temperature Vapor Deposition.
- CFAO : Conception et fabrication assistées par ordinateur.

Notations

-(c-BN)	: le nitrure de bore cubique
-DLC	: le carbone amorphe
-(a-CN _x)	: le nitrure de carbone amorphe
-PCD	: le diamant polycristallin
-TiN	: nitrure de titane
-CrN	: nitrure de chrome
-CBN	: Nitrure de bore
-PCD	: Diamant Polycristallin
-H	: chaud
-T	: les aciers contenant du tungstène
-M	: les aciers contenant du molybdène
-W	: trempant à l'eau
-O	: trempant à l'huile
-A	: trempant à l'air
-HRC	: dureté rockwell
-WC	: carbures de tungstène
-TiC	: carbures de titane
-TaC	: carbures de tantale
-NbC	: carbures de niobium
-TiN	: Nitrure de titane
-WC	: carbure de tungstène
-Co	: cobalt
-W	: tungstène
-HV	: dureté de Vickers qui se mesure avec une pyramide en diamant
-Å	: Ångström Unité de longueur
-keV	: kiloelectron volt
-3D	: Degrés de liberté dans l'espace

Introduction générale

Les besoins exprimés par les industriels et les utilisateurs indiquent clairement que les investissements en matière de machines et d'outils sont désormais systématiquement ramenés au coût de revient de la pièce. Le domaine de l'usinage est donc un enjeu important pour la rentabilité des produits, ce qui fait naître un besoin croissant de développements et d'innovation dans le domaine.

En s'appuyant sur les témoignages des industriels, des fabricants d'outils coupants et des constructeurs de machines, une vision de l'avenir des technologies d'usinage est proposée ici au travers de différents points de vue technologique, économique et écologique.

Aujourd'hui, l'usinage concerne des secteurs d'activité très divers qui expriment des besoins différents et imposent des problématiques différentes. Par exemple dans l'automobile, une tendance se dessine qui conduit à des volumes de copeaux en diminution, les ébauches étant plus près de la cote finie. Il en résulte une proportion d'opérations de finition croissante.

Pour l'évolution du parc machines, deux tiers des industriels soulignent la nécessité d'augmenter les vitesses de travail. La polyvalence des machines est considérée en seconde position. Puis apparaît l'automatisation, qui permet d'obtenir un meilleur taux d'utilisation des machines. Mais paradoxalement les professionnels ne recherchent pas la performance optimale par machine. La précision accessible est souvent située aux alentours de 5 μm tout confondus, mais elle reste au-dessus du centième pour 75 % des utilisateurs [1].

Pour les outils coupants, le coût outil/pièce et la durée de vie des outils se valent également en termes de priorités. De plus, les besoins sont équilibrés entre un développement plus complet des outils standards (rationalisation) ou des outils spéciaux (adaptation). En ce qui concerne la lubrification, sa suppression totale est une évidence pour la moitié des industriels, la microlubrification et la lubrification haute pression complètent les solutions d'avenir envisagées dans ce domaine.

Les services Recherche et Développement des sociétés d'outillage partagent les points de vue suivants considèrent les choses de la manière suivante. Chacune des entités du triplet pièce-machine-outil est potentiellement source d'évolutions importantes. Les pièces qui sont de plus

en plus ductiles ou celles qui ont des caractéristiques mécaniques élevées doivent être usinées avec des tolérances toujours plus serrées. Les machines, dont la précision et la rapidité des déplacements évoluent continuellement, grâce aux systèmes de CFAO performants, doivent faire face aujourd'hui à des problèmes de rigidité, de répartition de masses et de qualité d'amortissements (chocs, vibrations,...). Les outils se doivent d'être polyvalents, ce qui signifie qu'un même outil doit pouvoir exécuter différentes opérations.

Concernant les plaquettes des outils, celles-ci tendent à être miniaturisées, avec des préparations d'arêtes très fines et des géométries de plus en plus complexes. Les revêtements d'outils s'uniformisent et se généralisent permettant de s'orienter vers l'usinage à sec et d'obtenir des durées de vie d'outils supérieures. Les corps d'outils deviennent plus précis, pré-équilibrés à la conception et le choix des matériaux et des traitements est fait en fonction des opérations envisagées [2].

Chapitre I

*État de l'art et le but de
recherche.*

I. Procédés d'usinage

I.1. Introduction

L'usinage par enlèvement de matière est le moyen le plus fiable pour obtenir des pièces de précision, à partir de pièces moulées, extrudées ou forgées. Le procédé est, par contre, coûteux (machine, outils, hommes qualifiés) et relativement lent.

C'est pourquoi on essaye d'obtenir maintenant des pièces de moulage ne nécessitant pas d'usinage. Cela est possible avec le plastique ou le Zamac (Zn, Al, Mg), mais les qualités techniques : résistance à la chaleur ou limite élastique sont encore loin d'égaliser celles de l'acier ou des alliages d'aluminium [1].

Actuellement parmi tous les axes de recherche en fabrication, on peut en citer deux : l'UGV (ou usinage à grande vitesse) et les machines à axes parallèles qui offrent une grande mobilité de la tête d'usinage.

- Avec le travail à grande vitesse, la machine-outil passe à la vitesse supérieure.

La pièce usinée par UGV est d'une précision supérieure. Tout d'abord, les efforts de coupe sont réduits. Donc, la pièce subit moins de déformation. Ensuite, les températures sont dissipées dans les copeaux avant d'avoir le temps de pénétrer dans la pièce. Moins sollicitée en température, la pièce conserve sa stabilité dimensionnelle originelle [1].

L'état de surface de la pièce à usiner est amélioré par l'écoulement plastique du matériau dans la zone de cisaillement. L'augmentation du débit des copeaux autorise une meilleure productivité, qui peut être multipliée par un facteur de 3 à 10.

Enfin, l'UGV autorise l'usinage de pièces qu'il était impossible d'usiner auparavant avec les moyens conventionnels (comme les voiles minces en aéronautique, par exemple).

- Après avoir développé l'usinage à grande vitesse (UGV), les industriels se concentrent aujourd'hui sur le travail à grande vitesse.

Avec l'apparition de l'UGV, le secteur de la machine-outil a tourné une page de son histoire et entamé une irréversible évolution. Les pièces sont désormais usinées très rapidement, avec une précision toujours croissante. Seulement, l'usinage ne représente que 15 % du temps du cycle total de production [2].

Changement d'outils, acheminement de la pièce, positionnement broche/outil, évacuation de la pièce, etc. Pour une performance maximale, le centre d'usinage doit prendre en compte, non seulement le temps d'usinage proprement dit (temps copeau), mais également - et surtout - le temps hors usinage, qui représente à lui seul les 85 % restants du temps du cycle total de production. Aujourd'hui, l'UGV a laissé la place au travail à grande vitesse dans la liste des priorités des constructeurs de machines-outils [3].

I.1.1. Bref historique

Les outils coupants sont des instruments destinés à travailler la matière par enlèvement de copeaux. Il semble que les premiers outils obtenus par forgeage avant le début de l'ère chrétienne aient été le bédane, le burin et le foret à langue d'aspic, puis la lime et la scie [4].

Avec l'apparition du tour, le peigne a permis la création des outils de filetage : tarauds puis filières. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, tous les outils étaient ainsi fabriqués soit par forgeage et usinage, soit par usinage seul. Le matériau de coupe était l'acier fondu.

Dans le courant du XX^e siècle sont apparus d'une part de nouveaux matériaux (aciers rapides, carbures métalliques, céramiques, cermets, diamants, etc.) et d'autre part des techniques de mise en forme telles que moulage, rectification dans la masse, métallurgie des poudres, revêtements, l'ensemble fournissant des outils de plus en plus efficaces.

Depuis 1900 beaucoup de travaux ont été réalisés dans le domaine de coupe des métaux et plusieurs matériaux à outils ont été successivement introduits dont les performances sont de plus en plus élevées en ce qui concerne : La dureté des matériaux susceptibles d'être usinés et les vitesses de coupe utilisables [5].

La figure I.1 nous donne un aperçu sur l'évolution historique des vitesses pour l'usinage des aciers [5].

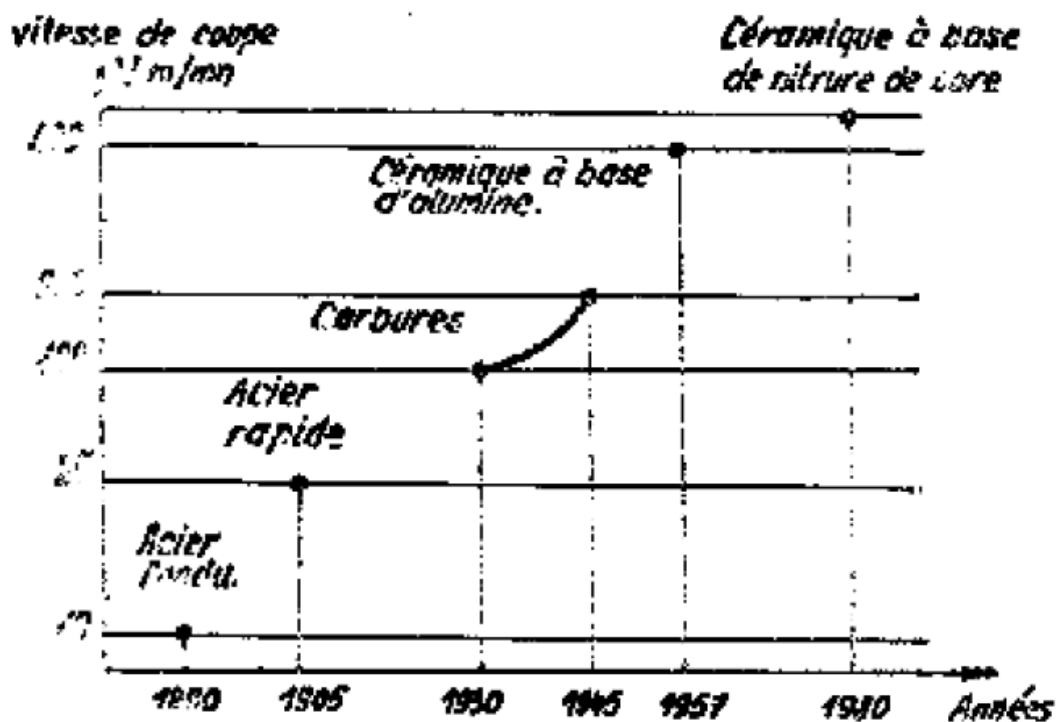


Fig.I.1-Évolution historique des vitesses pour l'usinage des aciers [5].

I.1.1.1 Évolution des outils de coupe

La Figure I.2 [6] donne une synthèse chronologique du développement des matériaux depuis l'invention, par Schröter en 1923[7], du carbure de tungstène cémenté au cobalt. Pendant 30 ans l'évolution a été lente, sans innovations notables [8].

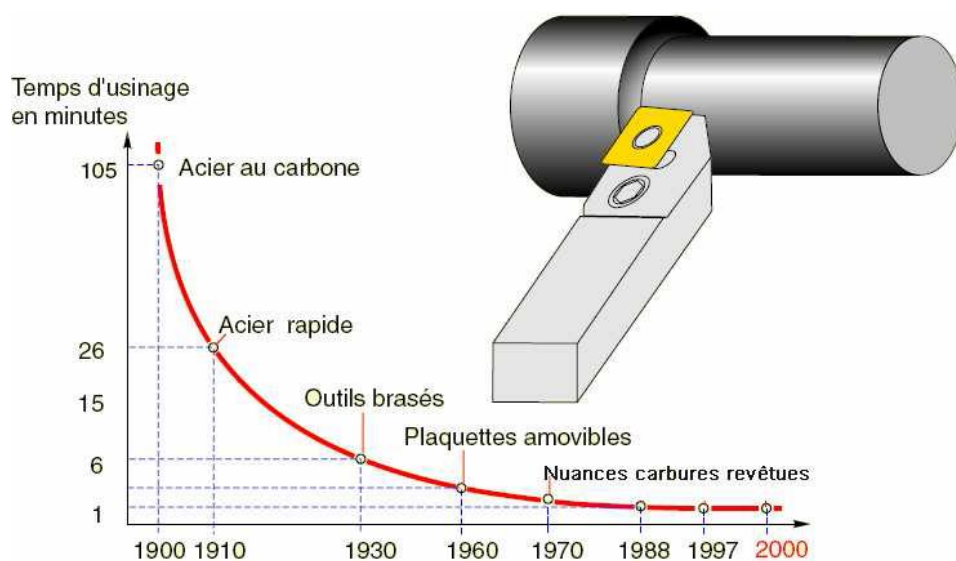


Fig.I.2-Historique de l'acier au carbure de tungstène revêtu, chariotage d'un cylindre de $\varnothing 100$, longueur de 500 mm [6].

Le chemin parcouru entre l'acier au carbone du début de XIXe siècle et les nuances carbure revêtues des années 1980 a conduit à réduire le temps d'usinage, pour une même pièce, d'un facteur 100. Une opération demandant 100 minutes avec un outil en acier à forte teneur en carbone, ne demandait plus que 26 min grâce à l'acier rapide, 6 min avec des outils en carbure (1930) et 1 minute avec les plaquettes en carbure revêtues multicouches (1970). La poursuite des exigences de productivité et d'utilisation de nouveaux matériaux de coupe souligne la continuité des recherches sur les outils de coupe.

I.2. Choix d'un procédé de fabrication

Coût comparatif d'une pièce entre les différents procédés en fonction de la série. Le choix de l'usinage est valable pour les petites séries, car il n'y a pas d'outillage spécifique (voir la figure I.3), par contre, dès que la série devient importante, le gain de temps et de matière devient prépondérant et permet des baisses de coût significatives [9].

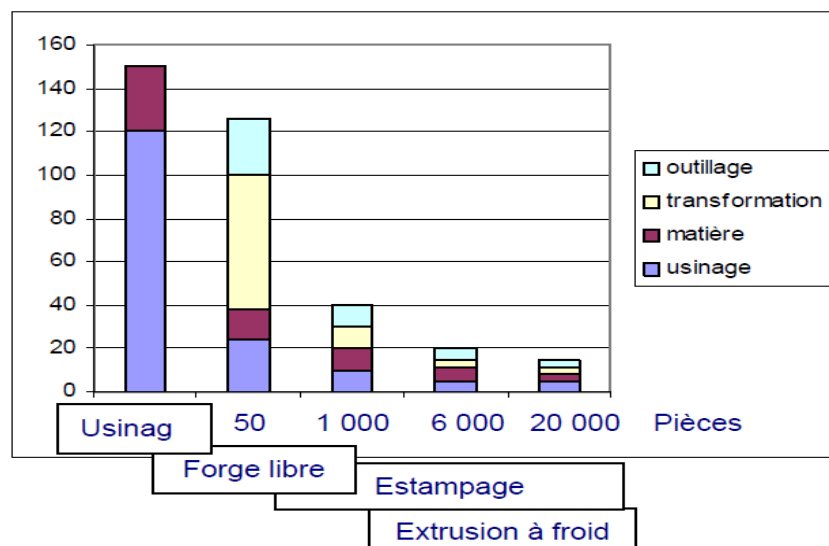


Fig.I.3- Procédés mécaniques et utilisation des outillages [9].

I.2.1. Critères de choix d'un matériau et d'un processus de fabrication

Le choix d'un matériau (fonte, aluminium, acier, cuivreux, ...) et du processus de fabrication (fonderie, forge, emboutissage, extrusion, ...) dépend en première approche de 4 familles de critères; technique (intrinsèque lié au matériau), économique (coût récurrent et coût non récurrent), technologique (lié au processus de transformation ou d'assemblage) et d'éco-conception. Le choix final résulte souvent d'un compromis entre ces différents critères [10].

Choix d'un matériau, un compromis entre plusieurs critères (technique, économique, ...)

I.2.1.1 Les critères techniques

Ils peuvent intégrer, en fonction du CdC de la pièce, et des contraintes en fonctionnement :

- Les caractéristiques mécaniques (R_m , $R_p0.2$, allongement, limite d'endurance en fatigue)
- La tenue en fonctionnement à chaud (220°C, 400°C, ...) en continue ou en pointe
- La masse volumique (recherche d'allègement)
- La résistance à l'usure
- La conductivité ou la diffusivité thermique (ou électrique)
- La tenue à la corrosion (brouillard salin pour l'automobile)

I.2.1.2. Les critères économiques

Sous le critère économique, on peut intégrer plus généralement la maîtrise des approvisionnements, la disponibilité des sources ou l'évolution prévisible des prix.

Il est donc nécessaire de prendre en compte :

- Le prix matière (et son évolution possible)
- La facilité de trouver un fournisseur (sources d'approvisionnement) avec le processus et le matériau retenu
- Les coûts récurrents (V_A processus) et les coûts non récurrents (prototype, outillage de série, mise au point initiale, échantillons initiaux) et la durée de vie des outillages
- Les autres coûts indirects (emballage, transport, ..., contrôle qualité)

I.2.1.3. Les critères technologiques

Les critères technologiques liés à l'environnement de la pièce influent sur la facilité de réalisation de sous-ensemble.

- L'assemblage (avec d'autres matériaux)
- L'usinabilité ou la possibilité de déformation (à froid ou à chaud)
- La possibilité d'automatisation du processus de fabrication
- Les traitements thermiques ou traitements de surface ultérieurs (anticorrosion, ...)

I.2.1.4. Les critères d'écoconception

Ces critères sont plus récents (et liés au concept de développement durable) et plus donc plus difficiles à évaluer de manière pertinente et objective faute de recul et de données fiables et tenant compte de l'impact sur la totalité du cycle de vie du produit.

Ces critères peuvent intégrer :

- L'impact en termes d'émission de CO₂ (ou de gaz à effet de serre plus globalement) du matériau et du processus retenu (en intégrant la production primaire, le transport, ...)
- L'impact en termes de facilité de recyclage ou de facilité de démontage en fin de vie du produit
- L'épuisement (ou non) de la réserve mondiale de matériau et la possibilité de trouver facilement des matériaux de substitution pour remplir la même fonction
- Impact sociétale (utilisation de sites de production, ...)

I.3. Importance de l'outil de coupe dans la construction des machines

Généralement la mise en forme de la matière pour produire des pièces de différents types de machines et d'appareils fait appel à des techniques très diverses et suivant l'état de la matière (liquide, solide ou pulvérulent) [11].

Donc deux types de solutions se présentent :

- a) La mise en forme par enlèvement de la matière qui est l'usinage ou coupe de matière et qui occupe une place de première importance en construction mécanique et dont les moyens sont sans cesse perfectionnés pour diminuer le coût de fabrication et améliorer la qualité du travail réalisé.
- b) La mise en forme sans enlèvement de la matière et parmi laquelle on peut citer:
 - Le Formage à chaud et à froid
 - La Fonderie
 - Et le Frittage

Ce qui nous intéresse dans cette partie est la coupe des métaux qui consiste à l'usinage des surfaces fonctionnelles des pièces mécaniques par enlèvement de la matière (copeaux) au moyen d'outils de coupe [11].

Avant l'évolution des techniques de coupe, la coupe des métaux s'effectuait avec des outils à main très simples dont certains se sont conservés jusqu'à nos jours sans changement important (lime d'ajusteur, pointe de graveur, scie, burin).

Aujourd'hui l'effort musculaire se trouve évincé par le travail de machines spéciales dites machines-outils (tour, fraiseuse, perceuse, rectifieuse, mortaiseuse, raboteuse, etc....).

Donc l'outil de coupe est un organe de machine-outil qu'en cours d'opération agit directement sur l'ébauche par enlèvement de matière pour produire une surface conforme à celle spécifiée sur le dessin de définition [11].

Dans l'usinage le matériau de base est à l'état solide appelé ébauche (état initial), après enlèvement du métal par coupe (transformation) on obtient la pièce mécanique à l'état final conforme aux spécifications du dessin de définition [11].

I.3.1. Paramètres du couple outil/matière

C'est ainsi qu'à côté de la mise au point de nouvelles familles de matériaux à taux inclusion aire contrôlé se sont développés de nouveaux procédés d'usinage pour réaliser des produits, soit en matériaux très difficiles à usiner, soit à des coûts de fabrication réduits [12].

On peut citer à titre d'exemple les techniques d'**usinage dur** et d'**usinage à grande vitesse (UGV)**. Dans le premier cas, il s'agit d'une technique en plein essor dans les entreprises de mécanique, car elle réduit le nombre d'opérations.

Dans le second cas, il s'agit d'un véritable saut technologique avec des caractères spécifiques qui impliquent des stratégies et des gammes d'usinage différentes de celles pratiquées aux vitesses conventionnelles [12].

Ces techniques d'usinage n'ont pu se développer que grâce à l'augmentation des performances des matériaux pour outils de coupe, à l'amélioration de la rigidité des machines-outils et à la détermination des conditions de coupe optimales sur la base des paramètres caractéristiques des couples outil-matière mis en œuvre [13].

L'opération d'usinage par enlèvement de matière met en présence un outil et la pièce à usiner. La figure 1 représente le **couple outil/matière** dans le cas de l'opération de tournage que nous prendrons comme exemple avec les principaux paramètres de coupe.

La productivité dans l'opération d'usinage est liée au **taux d'enlèvement de matière** (voir la figure I.3) qui, dans le cas du tournage, est égal à :

$$a_p \times f \times V_c \quad (I.1)$$

Avec

- a_p : profondeur de passe (mm) ;
- f : avance par tour (mm) ;
- V_c : vitesse de coupe (m/min).

Un **outil** est constitué d'une **partie active** et d'un corps qui supporte l'arête de coupe (voir la figure I.4). Son aptitude à l'emploi dépend de sa conception, de la géométrie de la partie active et de la nature du matériau constituant cette partie active [13].

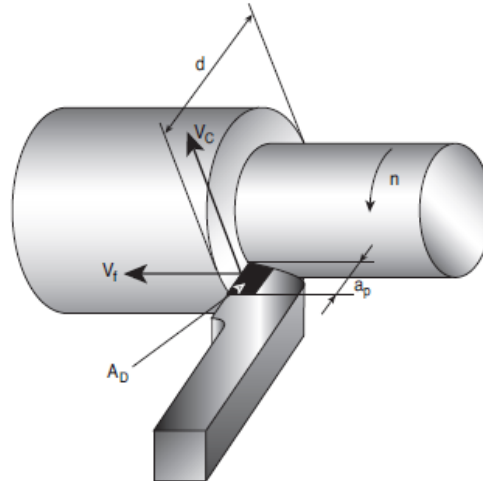


Fig.I.4-Paramètres de coupe en tournage [13].

a_p : profondeur de passe (mm) ; f : avance par tour (mm) ; V_t : vitesse d'avance (mm/min), soit $f \times n$; V_c : vitesse de coupe (m/min).

I.4. Les paramètres de coupe en tournage NEC 6185

Les conditions de coupe mises en jeu pendant le tournage, hormis les caractéristiques de l'outil, sont :

I.4.1. Vitesse de coupe

Le choix de la vitesse de coupe (V_c) dépend de la nature de l'opération effectuée et du couple outil-matière (caractéristiques physiques et mécaniques du matériau usiné et du matériau usinant). En pratique, la vitesse de coupe est réglée par la vitesse de rotation de la pièce (notée N et exprimée en $\text{tour} \cdot \text{mn}^{-1}$). Cette vitesse dépend de la vitesse de coupe et du diamètre de la pièce à usiner. La relation reliant la vitesse de coupe et la vitesse de rotation est donnée par l'équation I.2 [14].

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \cdot D} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

D : diamètre de la pièce exprimée en [mm],

V_c : vitesse de coupe [$\text{m} \cdot \text{mn}^{-1}$],

N : vitesse de rotation [$\text{tour} \cdot \text{mn}^{-1}$]

I.4.2. L'avance par tour

L'avance correspond au déplacement de l'outil en fonction de la rotation de la pièce pendant la formation de copeau. L'avance est notée f et est exprimée en mm.tour^{-1} (voir la figure I.4). Comme pour la vitesse de coupe, en pratique, l'avance s'exprime en vitesse d'avance V_f . Cette dernière représente la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport au bâti de la machine selon les axes longitudinal et transversal et en fonction du nombre de tours effectués par la pièce. Elle est donnée par l'équation I.3 [14].

$$V_f = f \times N \quad (\text{I.3})$$

Avec :

V_f : vitesse d'avance exprimée en mm.min^{-1} .

I.4.3. La profondeur de passe

La profondeur de passe représente la différence des rayons avant et après usinage (profondeur de la matière à enlever) (Figure I.5). Elle est notée a_p et exprimée en mm. En coupe orthogonale, ce paramètre disparaît, car il est confondu avec l'avance [15].

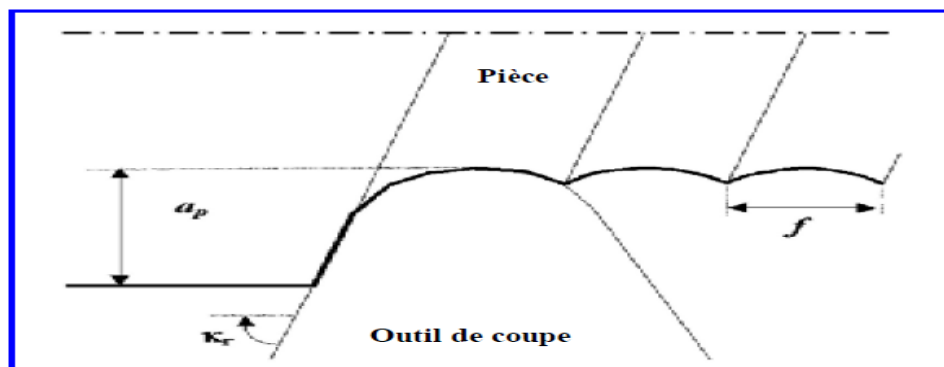


Fig.I.5-Définition de a_p et f en tournage [16].

I.5. Les outils de coupe

L'outil de coupe est l'élément qui enlève la matière. Il existe une très grande variété d'outils de coupe : différent type de géométries, de matériaux et de revêtements. Dans ces travaux, une configuration d'outil simple sera développée.

La partie active de l'outil fera l'objet d'une description (voir la figure I.5 (b)) géométrique simple, sans brise-copeau sur la face de coupe, sans préparation d'arête particulière. Un outil de coupe

de tournage peut être caractérisé par une géométrie d'arête et une orientation dans l'espace définie par des angles de coupe normalisés [16].

I.5.1 La géométrie de l'arête de coupe

Usuellement dans les modèles de coupe, la partie active de l'outil est définie par trois plans (voir la figure I.6 (a)) sans raccordement. En réalité, la zone de coupe de l'outil est constituée de 3 plans raccordés par deux rayons (figure I.6 (b)) : le rayon de bec ε et le rayon d'acuité de l'arête de coupe, qui est souvent négligée dans un grand nombre de modèles [17].

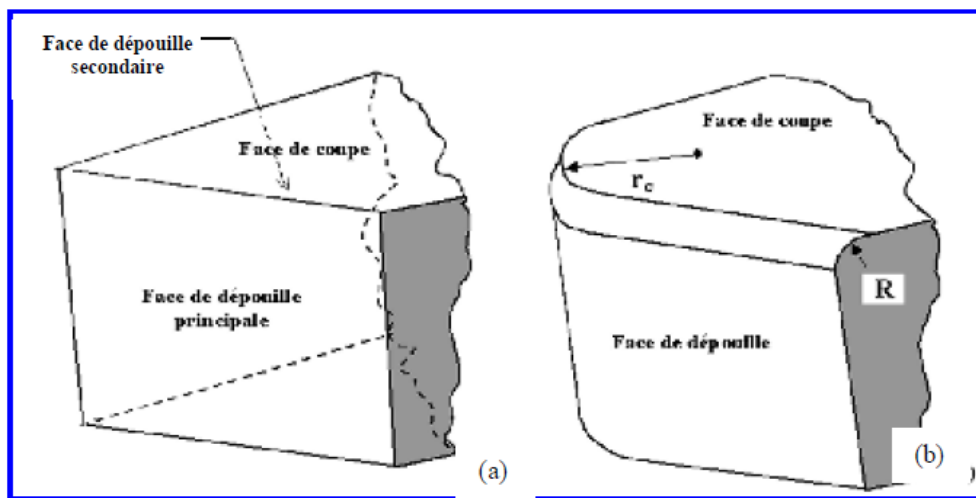


Fig.I.6-Géométrie de l'arête de coupe [16].

I.5.2. Les angles de coupe

L'orientation, dans la configuration outil en main, de l'arête de l'outil de coupe, de la face de coupe et de la face de dévissage (voir la figure I.7) est définie par l'expression de différents angles caractéristiques [17].

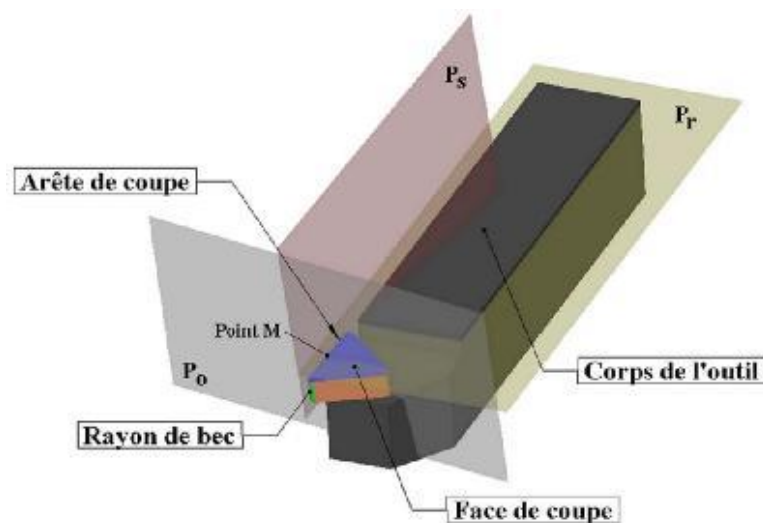


Fig.I.7-Définition basique d'un outil de coupe de tournage [16].

Pour définir ces angles, des plans de référence doivent être introduits [16] :

- Le plan de référence de l'outil P_r passe par un point M de l'arête de coupe et est parallèle au plan de base servant de face d'appui au corps de l'outil.
- Le plan d'arête de l'outil P_s est tangent à l'arête de coupe au point M et perpendiculaire au plan de référence P_r .
- Le plan orthogonal de l'outil P_o est perpendiculaire au plan de référence P_r et au plan d'arête de l'outil P_s , au point M .

Ainsi sont définis :

- L'angle de direction d'arête de l'outil K_r (figure I.8).

C'est l'angle, projeté dans le plan P_r , entre l'arête de coupe et la direction d'avance, défini par la direction de la vitesse d'avance.

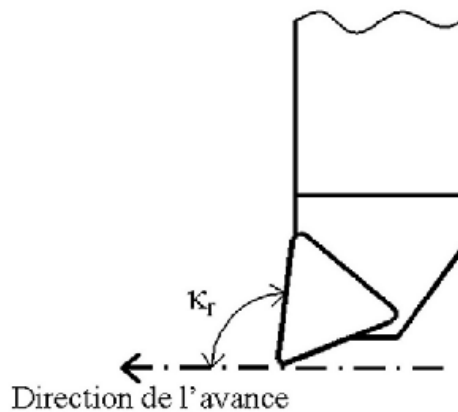


Fig.I.8-Angle de direction d'arête de l'outil. [16]

L'angle d'inclinaison d'arête de l'outil λ_s : c'est l'angle (figure I.9) dans le plan s entre l'arête de coupe et le plan de référence P_r de l'outil.

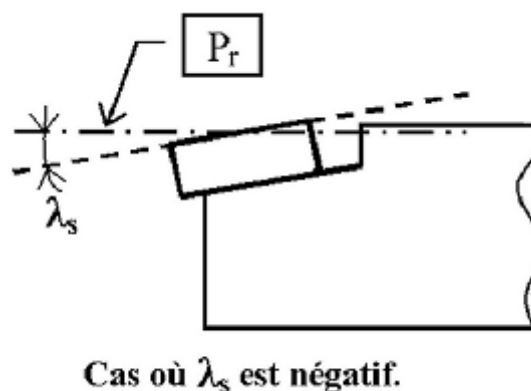


Fig.I.9-Angle d'inclinaison d'arête. [16]

Les caractéristiques géométriques de la partie active de l'outil de coupe sont définies (Figure I.9) dans le plan par trois angles P_o :

- L'angle entre la face de coupe et le plan de référence P_r dénommé γ_0 , l'angle de coupe (figure I.10).
- L'angle entre la face de coupe et face de dépouille dénommé β_0 , l'angle de taillant (Figure I.10).
- L'angle entre la face de dépouille et le plan perpendiculaire au plan de référence P_r dénommé α_0 , l'angle de dépouille principal (Figure I.10).

Les faces de coupe et de dépouille sont reliées par le rayon d'acuité R .

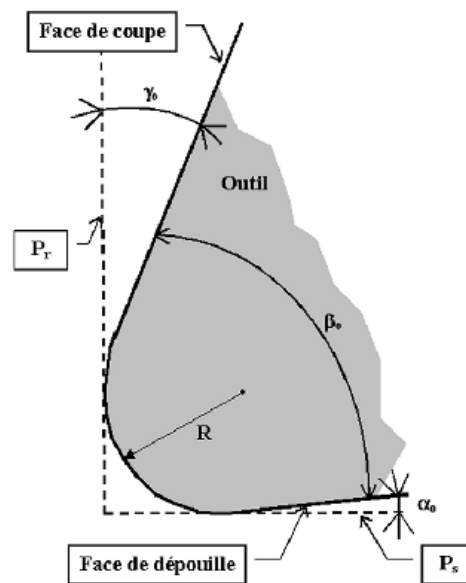


Fig.I.10-Arête de coupe dans le plan P_o [16].

I.6. Classification des outils

Généralement les outils de coupe sont classés en trois groupes [13] :

- Les outils simples à tranchant uniques: outil de Tournage et de Rabotage outil de Tournage et de Rabotage.
- Les outils associés ou outils à arêtes multiples: outils fraise, forêt, alésoir, scie, lime, etc.
- Les outils-meules: ce sont des outils à arêtes multiples dont le mode d'action est un peu différent de celui des outils du 2e groupe

I.7. Matériaux d'outillage et exigence principale de l'outil de coupe

Les performances des machines-outils dépendent étroitement de celles des outils de coupe qu'elles actionnent et des conditions d'utilisation des outils.

Pour que l'arête tranchante d'un outil de coupe reste toujours vive, elle ne doit pas s'user, ainsi, la matière qui la constitue doit être plus dure que celle de la pièce à usiner. Comme la dureté d'un métal et sa résistance varient en sens inverse, on doit prendre des précautions particulières pour avoir une partie active, sur laquelle se forme les copeaux, très durs et un corps résilient et résistant à la flexion et la torsion. D'où l'idée de constituer un outil en deux parties [13].

- L'une (active) en matériau dur avec ou sans traitement thermique.
- L'autre (passive) sur laquelle est rapportée la partie active, soit par plaquette montée mécaniquement ou par soudo-brasage, soit par soudage électrique par rapprochement, soit par sertissage.

La partie active de l'outil servant à couper la matière doit posséder les qualités suivantes:

- Résistance élevée aux sollicitations (résistance aux chocs, à la traction, compression, etc....).
- Dureté élevée des faces de coupe et de dépouille (des surfaces dont l'intersection forme l'arête coupante) pour pouvoir pénétrer dans le métal usiné.
- Faible rugosité ($R_a = 1.6 \mu\text{m}$) des faces de coupe et de dépouille. Conservation de la dureté à des températures élevées (500 à 900°C) pour limiter les effets de l'usure sur les faces de coupe et de dépouille. Dans ce contexte qu'elles sont les matériaux qu'il faut adapter, pour assure ces qualités [13].

I.8. But de travail

Le but de ce travail, selon le marché international, les fabricants d'outils et le développement croissant dans le domaine de l'usinage, il est présomptueux de vouloir décrire les outils de coupe. Il est toutefois intéressant de fournir des informations supplémentaires sur chaque outil, ses avantages et ses recommandations, afin de rationaliser et d'optimiser leurs utilisations. D'étudier le processus d'évolution amenant au lancement des nouvelles gammes d'outils.

De plus, la recherche offre un aperçu de toute la gamme des matériaux de coupe (alliages ou revêtements) pour accommoder les outils suivant leurs applications appropriées, ce sont néanmoins les besoins exprimés par l'industrie qui conditionnent la définition des outils du futur, à travers l'expertise du fabricant d'outils.

Les tendances perçues aujourd'hui par les fabricants vont dans le sens d'une plus grande précision dimensionnelle, d'une meilleure intégrité de surface, et de la miniaturisation des opérations, mais aussi vers l'usinage de matériaux légers, abrasifs, ou de nouveaux alliages, plus durs ou indéformables.

En plus, toutes ces performances accrues visent la réduction du coût de production des pièces grâce à la diminution des temps d'usinage.

Chapitre II

*Principaux matériaux
des outils de coupe.*

II.1 Introduction

L'industrie mécanique s'est développée grâce aux technologies diversifiées de fabrication de pièces et composants qui constituent les ensembles et sous-ensembles mécaniques. Cependant, les techniques de moulage et d'estampage n'arrivent pas à satisfaire les besoins mécaniques en pièces et composants spécifiques. Parmi les principaux procédés de fabrication mécanique, il est indispensable d'en citer l'usinage des métaux qui a contribué le plus dans la fabrication et la finition des pièces de précision [18].

L'usinage des métaux consiste à façonner et finir une surface de pièce de configuration donnée par un ensemble d'opérations à effectuer à l'aide de machines-outils. La coupe des métaux reste aujourd'hui l'un des procédés les plus largement utilisés malgré l'apparition de nouvelles techniques durant ces dernières années. La recherche d'une meilleure productivité est donc une préoccupation majeure.

Pour assurer la fiabilité et la performance de l'usinage, il est très important que le matériau de l'outil de coupe et la géométrie de la plaquette correspondent au matériau de la pièce (figure II.1). D'autres paramètres, tels que, par exemple, les modes de coupe, la trajectoire de l'outil, ont également un effet important sur les résultats de l'usinage [18].

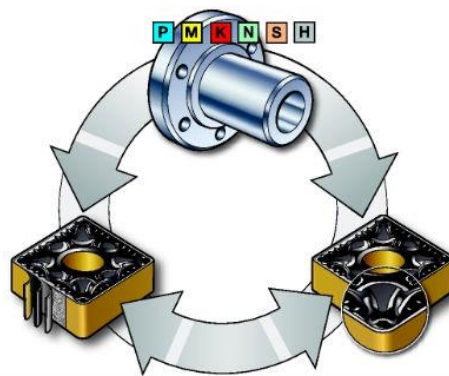


Fig.II.1-Interrelation outils/pièces [20].

Ce travail fournit des informations de base sur:

- Matériaux pour outils de coupe - alliages durs, céramiques, CBN, PCD et autre voir la figure II.2.
- Les matériaux et la classification des ébauches en termes d'usinabilité.

Le choix du matériau de l'outil de coupe est un facteur important lors de la planification d'une opération réussie de métal.

Par conséquent, pour un choix correct dans chaque domaine d'application, une connaissance de base des caractéristiques de chaque matériau est importante. Lors du choix de ce dernier, il est nécessaire de prendre en compte à la fois le matériau de la pièce à traiter, sa forme et les exigences de précision et de qualité [18].



Fig.II.2-Matériaux pour outils de coupe [34].

Le but de ce chapitre est de fournir des informations complémentaires sur chaque matériau, ses avantages et ses recommandations pour une utilisation optimale. De plus, un aperçu de toute la gamme de matériaux de coupe pour chaque application est donné.

II.2 Démarche du choix de l'outil coupant

Le choix de l'outil coupant est une tâche difficile en raison de la diversité des matériaux d'outils produits et de leurs conceptions pour façonner les mêmes surfaces. Lors du développement de procédés technologiques, les tâches suivantes doivent être résolues [19]:

a) choix de l'outil :

- Les constructions d'outils;
- Matériaux de l'outillage (si nécessaire, établir la présence de revêtements résistants à l'usure, y compris les revêtements multicouches);
- Les paramètres géométriques de l'outil en relation avec les conditions de l'usinage des pièces;

b) Définitions:

- Des régimes de coupe prenant en compte la productivité, la précision et la qualité de la surface traitée, y compris pour les nouveaux matériaux de construction;
- Le coût admissible de l'outil, en tenant compte de la productivité et du coût des heures de fonctionnement de l'équipement [19].

Les tâches ci-dessus peuvent être résolues par des essais industriels, de production et des études de laboratoire sur des outils et des matériaux d'outils.

Indépendamment du lieu de travail en préparation des essais (études), les travaux préparatoires suivants doivent être réalisés:

- Mettre la machine-outil adaptée pour l'exécution
- Attribuez un opérateur qualifié.
- Préparer les ébauches.
- Préparer un outil de coupe pour un lot de production.
- Produire ou sélectionner montage d'usinage

Les matériaux pour outils coupants ont des combinaisons différentes de dureté, de solidité et de résistance à l'usure, et ils sont subdivisés selon les marques des alliages ayant des propriétés distinctives. Le matériau optimal de l'outil de coupe doit être [20]:

- Rigide, résistant à l'usure sur la surface en dépouille et à la déformation
- Solide, résistant à l'écaillage et à la rupture
- Chimiquement neutre par rapport au matériau de la pièce
- Chimiquement résistant, résistant à l'oxydation et à la diffusion
- Résistant aux changements brusques de température

II.3 Principaux fabricants mondiaux d'outils de coupe

Actuellement, un grand nombre d'entreprises spécialisées dans la production d'outils de coupe de métaux sont présentes sur le marché voir le tableau II.1. Chacun d'entre eux utilise ses propres technologies et ses matériaux, mais tous leurs produits sont conformes et répondent aux normes ISO.

Aujourd'hui, l'outil coupant moderne est considéré comme un système dont son fonctionnement est influencé par la géométrie de l'outil, le matériau de la partie tranchante et le revêtement de cette partie [21].

Tous les éléments se complètent les uns les autres, et le choix incorrect de l'un d'entre eux peut considérablement aggraver l'ensemble des résultats. Cependant, l'élément fondamental dans le système est le matériau de la partie tranchante.

Tableau II.1 Caractéristiques des principaux fabricants mondiaux d'outils de coupe [19] :

N°	Appellation	Pays	Catégorie de prix	Production
1	Sandvik	Suède	Supérieure	<ul style="list-style-type: none"> • Plaquettes au carbure • Alésoires • Outil coupant [couteau; lame; ciseau] • Forets • Forets
2	Seco	Suède	Supérieure	<ul style="list-style-type: none"> • Forets aléseurs • Outil à chambrer (fraise conique) • Outils de taraudage • Plaquettes au carbure • Alésoires • Outil coupant [couteau; lame; ciseau] • Forets • Fraises
3	Mitsubishi	Japon	Supérieure	<ul style="list-style-type: none"> • Plaques de coupe interchangeables • Outil coupant [couteau; lame; ciseau] • Outils d'alésage • Outil de filetage • Fraises • Forets
4	TaeguTec	Corée	Basse	<ul style="list-style-type: none"> • Plaques de coupe interchangeables • Outil coupant [couteau; lame; ciseau] • Outils d'alésage • Outil de filetage • Fraises • Forets
5	Walter	Allemagne	Moyenne	<ul style="list-style-type: none"> • Outil coupant [couteau; lame; ciseau] • Plaques de coupe interchangeables • Porte outil • Forets • Fraises • Outils de taraudage • Outil de filetage • Alésoires
6	PKF outil-service»	Russie	Basse	<ul style="list-style-type: none"> • Fraises • Outil coupant [couteau; lame; ciseau] • Plaquettes au carbure • Forets • Outils de taraudage • Alésoires • Forets aléseurs • Outil à chambrer (fraise conique) • Lames de scie circulaire
7	PETBOR	Russie	Moyenne	<ul style="list-style-type: none"> • Fraises • outil coupant [couteau; lame; ciseau] • plaquettes au carbure • forets
8	ZCC	Chine	Basse	<ul style="list-style-type: none"> • Plaques en carbure fritté pour fraisage • Plaques en carbure revêtu fritté et avec différents angles de fixation montage pour les opérations de tournage • Outils de précision polyèdres et micro-forets en carbure fritté

La marque de l'alliage de la plaque est choisie en fonction du matériau de la pièce, les conditions de traitement et le type d'opération. La désignation de l'alliage indique le type d'outils et du matériel et le domaine d'application de ce matériau. Le matériau de l'outil et de la géométrie de la plaque travaillent ensemble et, par exemple, le manque de résistance de la géométrie peut être compensé par la résistance de l'alliage.

Les matériaux des outils coupants modernes sont divers et leur développement se poursuit. Dans le même temps, non seulement les matériaux des outils se développent, mais aussi les procédés technologiques de leur fabrication. Cela a conduit au fait qu'il y a maintenant un outil performant pour tous les types de traitement [23].

II.4 Les principaux matériaux des outils coupants

Les principaux matériaux des outils coupants sont :

II.4.1 Les aciers à outils

II.4.1.1 Introduction

Les aciers à outils sont utilisés lors de la mise en forme des métaux à froid et à chaud (poinçons, matrices, cylindres de laminoirs). Les aciers à outils font partie intégrante du domaine des aciers spéciaux, mais ils diffèrent sensiblement des aciers de construction mécanique. En effet, dans le cas d'un outil, on recherche le maximum de dureté, sans fixer de limite supérieure, alors que l'acier de construction mécanique doit présenter une aptitude suffisante à l'emploi avec des caractéristiques spécifiques bien déterminées à savoir la tenue en fatigue, la résistance à la rupture et l'aptitude à subir un cycle thermomécanique au cours de la mise en œuvre. Par ailleurs, l'outil 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 intéressent l'ensemble du matériau [19]. De ce fait, ces aciers sont caractérisés par une dureté élevée, une bonne résistance à l'usure et une ténacité assez élevée [24].

II.4.1.2 Classification

La propriété essentielle d'un acier à outil est la dureté qui exprime la résistance du matériau à l'enfoncement ou à la déformation. Cette propriété doit être atteinte soit à la température ambiante, soit le plus souvent à chaud avec des maintiens sous charge souvent prolongés. Suivant la composition chimique de l'acier, des niveaux de duretés compris entre 40 et 70 HRC peuvent être obtenus après un traitement thermique de trempe et un revenu [24].

Dans la mesure où les phénomènes de contact avec les matériaux mis en forme par déformation à froid ou à chaud ou par usinage peuvent entraîner des échauffements importants, il est nécessaire

l'acier constituant l'outillage ait en plus une résistance à chaud suffisante pour éviter un adoucissement trop important en service [24].

C'est cette dernière propriété qui permet de classer les aciers à outils en quatre groupes conformément à la norme ISO/DIS 4957 qui a remplacé la norme NF A 35590. Cette norme s'applique à toutes les normes de produits laminés à chaud ou à froid, forgés ou étirés, et ne prend en compte que les aciers ont acquis une certaine renommée internationale. Elle désigne les aciers à outils suivant quatre groupes différents:

- les aciers non alliés pour travail à froid,
- les aciers alliés pour travail à froid (température de surface inférieure à 200 °C),
- les aciers alliés pour travail à chaud (température de surface supérieure à 200°C),
- les aciers rapides, température de surface peuvent atteindre, ou elle dépasse 600 °C).

Comparativement à la norme ISO/DIS 4957, la désignation américaine fait appel à des lettres qui rappellent, soit les propriétés d'emploi (H pour chaud), soit la composition chimique (T et M pour les aciers contenant du tungstène ou du molybdène), soit les propriétés de mise en œuvre (W pour trempant à l'eau, O pour trempant à l'huile et A pour trempant à l'air) [25].

II.4.1.2.1 Les aciers à outils non alliés pour travail à froid

C'est les plus simples puisqu'ils ne contiennent que du fer et du carbone (0,45 à 1,2 %), les autres éléments y étant présents en teneurs résiduelles variables selon les matières premières et le mode d'élaboration utilisés.

À teneur en carbone égale, ces aciers acquièrent après trempe des duretés aussi élevées que celles des aciers alliés. Ils diffèrent cependant de ces derniers, par une trempabilité plus faible, ce qui limite leur emploi à des pièces de sections relativement étroites. Leur trempabilité limitée conduit également à l'emploi de moyens de trempe énergiques : eau pure ou salée, et plus rarement pour des pièces de faible section, l'huile.

En contrepartie, les aciers au carbone sont moins durs à l'état recuit et présentent de ce fait, une usinabilité et une aptitude de formage à froid bien meilleure [25].

II.4.1.2.2 Les aciers à outils alliés pour travail à froid

Ces aciers dont la dureté à la température ambiante est supérieure à 50 HRC, mais avec un abaissement sensible au-dessus de 300 °C, peuvent être divisés en quatre groupes, selon les propriétés d'emploi requis :

II.4.1.2.2.1 Les aciers résistants aux chocs mécaniques, caractérisés par des teneurs en carbone compris entre 0,35 et 0,6 % et des additions de chrome, de silicium, de nickel ou de tungstène (50WCrV8, 45NiCrMo16, 35CrMo7);

II.4.1.2.2.2 Les aciers résistants à l'usure, caractérisés par des teneurs en carbone supérieures à 0,9 %, avec des additions de manganèse, de chrome et de vanadium (105V, 99Cr6, 90MnCrV8, 95MnWCr5);

II.4.1.2.2.3 Les aciers à très haute résistance à l'usure, caractérisés par des teneurs en carbone supérieures à 0,9 % et des teneurs importantes en chrome, en molybdène et en vanadium (X100CrMoV8, X153CrMoV12, X210Cr12, X210CrW12);

II.4.1.2.2.4 Les aciers résistant à la corrosion, caractérisés par des additions importantes de chrome et des teneurs en carbone voisines de 0,4 % (X40Cr14, X38CrMo16).

II.4.1.2.3 Les aciers à outils alliés pour travail à chaud

Ils sont caractérisés par une dureté à la température ambiante relativement élevée, comprise entre 40 et 56 HRC, et par une bonne dureté à chaud. Ces aciers sont répartis en trois groupes :

II.4.1.2.3.1 Les aciers résistants aux chocs mécaniques

Ils sont analogues aux aciers de construction à hautes caractéristiques, mais avec une teneur en carbone plus élevée et une addition de vanadium pour augmenter la résistance au revenu (55NiCrMoV7, 50CrMoV13-15).

II.4.1.2.3.2 Les aciers résistants aux chocs thermiques

Ils sont centrés sur les compositions chimiques à 3 et 5 % de chrome, avec addition de molybdène, de tungstène, de vanadium, éventuellement de cobalt pour augmenter les propriétés mécaniques à chaud (32CrMoV12-28, X37CrMoV5-3, X38CrMoV5-1, X35CrWmoV5);

II.4.1.2.3.3 Les aciers résistants à l'usure aux températures élevées

Ils comportent des nuances à forte addition de tungstène, de chrome, de molybdène et de cobalt afin d'augmenter la pénétration de trempe et le niveau de caractéristiques mécaniques [3]. La présence de ces éléments en teneurs élevées contribue à un meilleur comportement à chaud de ces aciers, qui conservent ainsi aux températures de service des valeurs élevées de dureté et de résistance à l'usure ainsi qu'au fluage. La résistance à l'adoucissement au revenu s'en trouve également améliorée.

Ces avantages comportent, en contrepartie, une moins bonne tenue aux chocs mécaniques ou thermiques. La nécessité d'appliquer des températures de trempe élevées implique la prise en considération de grandes précautions quant au réchauffage de trempe, et au non-refroidissement à l'eau des outillages ainsi chauffés (X30WCrV9-3, 38CrCoWV18-17-17) [3].

II.4.1.2.4 Les aciers rapides

Ces aciers sont caractérisés par une très grande dureté supérieure à 60 HRC à la température ambiante et par une très bonne dureté à chaud. Ce sont des aciers fortement alliés qui contiennent plus de 0,7 % de carbone et des éléments susceptibles de former des carbures : 4 % de chrome dans tous les cas, (W), du molybdène (D), du vanadium (V), en proportion variable, éventuellement du cobalt (K) qui a pour rôle d'augmenter la dureté à chaud [26].

Ils ont la propriété de pouvoir acquérir, après trempe, une dureté très élevée, et de la conserver jusqu'à une température de l'ordre de 600 °C. Il existe un grand nombre de combinaisons possibles de ces alliages, la norme NF A 35-590 en retient 16, parmi lesquelles des aciers surcarbures et des aciers au cobalt. Ces aciers peuvent être classés suivant l'élément de l'alliage dominant en quatre groupes [26]:

II.4.1.2.4.1 Les aciers rapides de base, caractérisés par une teneur en carbone comprise entre 0,8 et 1 % et une teneur en vanadium centrée sur 1 ou 2 % (HS 1-4-1, 2-9-2);

II.4.1.2.4.2 Les aciers rapides surcarbures, caractérisés par rapport aux précédents par une augmentation de la teneur en carbone et en vanadium dans la proportion du carbure de vanadium (HS 6-6-2, 6-5-3);

II.4.1.2.4.3 Les aciers rapides au cobalt, caractérisés par une addition de 5 % de cobalt pour améliorer les propriétés de dureté à chaud (HS 6-5-2-5);

II.4.1.2.4.4 Les aciers sur carbures au cobalt, caractérisés par de hautes teneurs en carbone et en vanadium, avec des additions de cobalt pouvant atteindre 10 % (HS 6-5-3-8) [28].

Le **Tableau II.2** représente la désignation et la composition chimique de quelques nuances des aciers à outils de travail à chaud [27].

Tableau 1 : composition chimique, dureté à l'état recuit, température de trempe et dureté à l'état trempé et revenu des aciers à outils pour travail à chaud, d'après la norme ISO/DIS 4957 [5].

Désignation De l'acier	Composition chimique en %							Dureté HB (à l'état recuit)	Essai de trempabilité			
	symbolique	C	Si	Mn	Cr	Mo	V		W	Température de trempe °C	Milieu de trempe	Température de revenu
55NiCrMoV7	0.5-0.6	0.1-0.4	0.6-0.9	0.8-1.2	0.35-0.55	0.05-0.15	--	248	850	huile	500	42
32CrMoV12-28	0.28-0.35	0.1-0.4	0.15-0.45	2.7-3.2	2.5-3.0	0.4-0.7	--	229	1040	huile	550	46
X37CrMoV5-1	0.33-0.41	0.8-1.2	0.25-0.5	4.8-5.5	1.1-1.5	0.3-0.5	--	229	1020	huile	550	48
X38CrMoV5-3	0.35-0.4	0.3-0.5	0.3-0.5	4.8-5.2	2.7-3.2	0.4-0.6	--	229	1040	huile	550	50
X40CrMoV5-1	0.35-0.42	0.8-1.2	0.25-0.5	4.8-5.5	1.2-1.5	0.85-1.15	--	229	1020	huile	550	50
50CrMoV13-15	0.45-0.55	0.2-0.8	0.5-0.9	3.0-3.5	1.3-1.7	0.15-0.35	--	248	1010	huile	510	56
X30WCrV9-3	0.25-0.35	0.1-0.4	0.15-0.45	2.5-3.2	--	0.3-0.5	8.5-9.5	241	1150	huile	600	48
X35CrWMoV5	0.32-0.4	0.8-1.2	0.2-0.5	4.75-5.5	1.25-1.6	0.2-0.5	1.1-1.6	229	1020	huile	550	48
38CrCoWV18-17-17	0.35-0.45	0.15-0.5	0.2-0.5	4.0-4.7	0.3-0.5	1.7-2.1	3.8-4.5	260	1120	huile	600	48

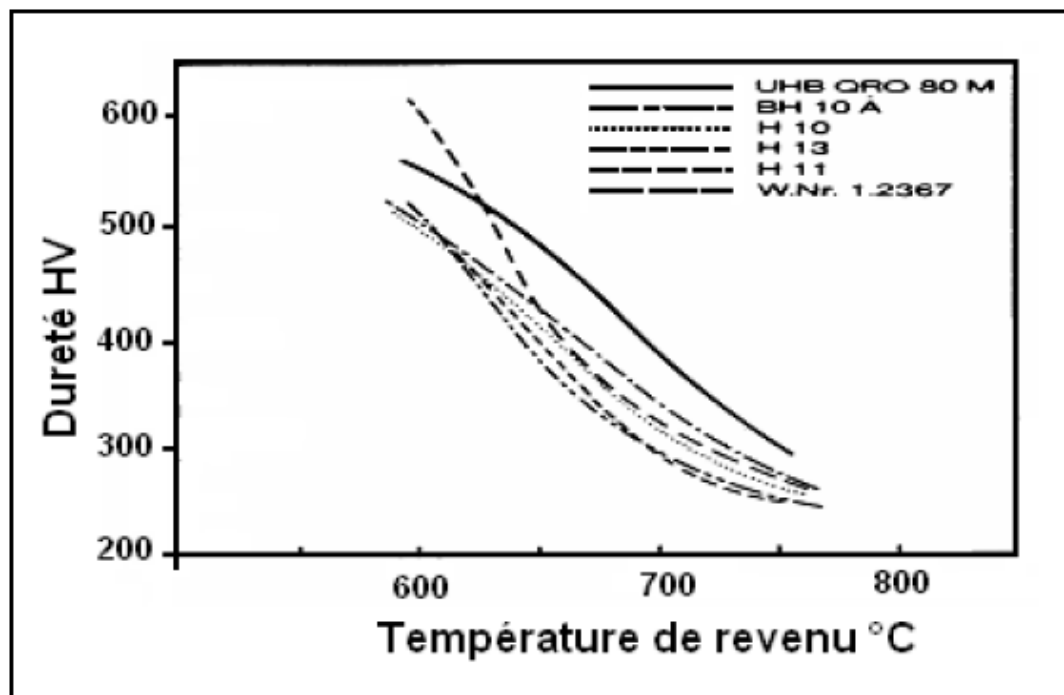


Fig.II.3-Évolution de la dureté en fonction de la température de revenu pour quelques nuances d'aciers à outils de travail à chaud [27].

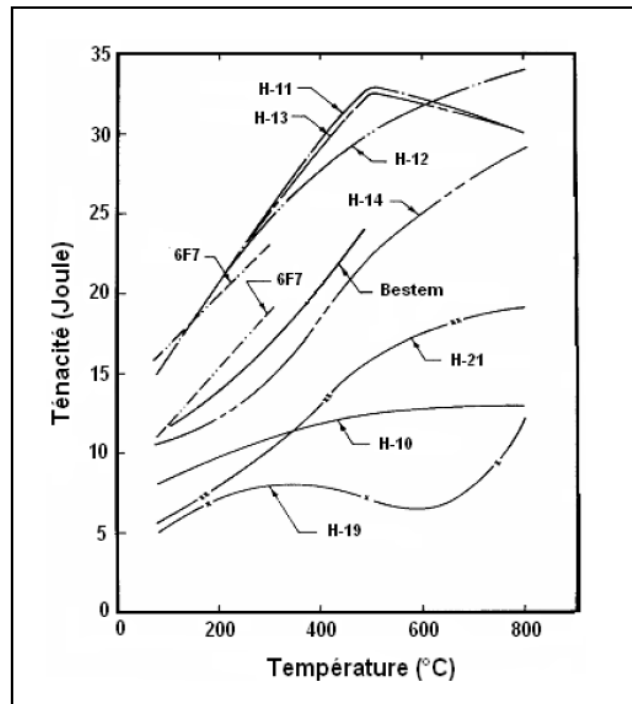


Fig.II.4-Évolution de la ténacité en fonction de la température de quelques aciers à outils [27].

II.4.2. Les carbures métalliques

Les outils les plus répandus actuellement sont constitués d'une plaquette en carbure métallique. Les carbures sont des agglomérés de carbures divers (titane, bore, tungstène) et de cobalt obtenus par frittage et dont la dureté est proche de celle du diamant. Bien que fragiles et sensibles aux variations de température, les carbures métalliques conservent leur dureté jusqu'à environ 1000°C. L'avantage de ce type de matériaux est qu'on peut utiliser des vitesses de coupe élevées et de fortes passes dans l'usinage de divers matériaux [30].

Le carbure, matériau à tout faire dans l'usinage avec une fiabilité et longévité garantie qui se trouve en 3 catégories:

Carbure cimenté non revêtu

Carbure cimenté revêtu

Carbure cimenté

Le carbure, surtout le carbure cimenté, a la particularité d'être fiable en tous points, une qualité qui le fait entrer dans la composition de plusieurs outils d'usinage pour les métiers de l'industrie. À la fois denses, très tenaces et résistants à l'échauffement, à la déformation, aux chocs et à une pression élevée, les outils carburés conviennent aussi bien à l'usinage à grande vitesse qu'aux procédés d'usinage à vitesse conventionnelle.

Ces outils carbure, du fait de leurs caractéristiques mécaniques, sont ainsi utilisés dans l'usinage de différents matériaux, dont l'acier rapide, les alliages cuivreux et même les alliages de

titane, renforcés avec des revêtements de diamant polycristallin ou de nitrure de bore, les outils carbure sont utilisés dans les applications extrêmes sur des matériaux d'une dureté allant jusqu'à 70 HRC.

Le secret des caractéristiques du carbure cimenté réside dans sa composition unique. Ce matériau est composé de particules de carbure – un composé chimique constitué de molécules de carbone et d'un élément autre que l'oxygène, liés entre elles par un liant métallique. La forme de carbure la plus répandue est constituée avec du carbure de tungstène, représentant la phase dure, associée au cobalt Co, ce dernier étant le liant métallique. La centaine de nuances disponibles sur le marché est obtenue par variation des proportions de la phase dure du carbure et du liant métallique [30].

II.4.2.1. Carbure cimenté revêtu (Alliage dur à revêtement (hard coating (HC)))

Le carbure cimenté revêtu représente 80 à 90 % de toutes les plaquettes. La popularité de ce matériau de coupe est due autant à sa ténacité et sa résistance à l'usure qu'à sa capacité à être formé en géométries complexes.

Le carbure cimenté revêtu figure II.5 comporte un substrat en carbure cimenté et un revêtement de surface. L'ensemble constitue une nuance optimisée pour un champ d'applications donné [31].



Fig.II.5-Alliage dur avec un revêtement [34].

Les plaquettes en carbure cimenté revêtues sont le premier choix pour toute une variété d'outils et d'applications.

Les carbures existent de plus en plus sous forme revêtu. Ce revêtement en couches de quelques microns (1 à 20 μm) est constitué, selon les applications :

- de nitrure de titane (TiN), d'une dureté d'environ 2 000 HV (jaune d'or) ;
- de carbure de titane (TiC), d'une dureté d'environ 3 900 HV (gris) ;
- de carbonitrure de titane (Ti) (C1N), d'une dureté de 3 000 HV (gris) ;
- d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), d'une dureté d'environ 2 400 (noir).

Ces revêtements améliorent très nettement les possibilités des outils, en particulier la durée de vie, grâce à une réduction importante du frottement copeau/outil et pièce/outil. Les résultats sont surtout spectaculaires sur les aciers rapides (certains fabricants de fraises annoncent une augmentation de la durée de vie de 500 %) [31].

- Principaux revêtements pour les outils en carbures métalliques figure II.6 [32] :

• Type de revêtement en Titan

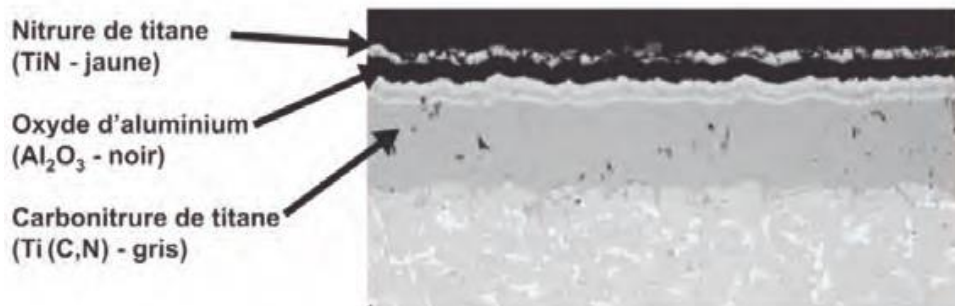


Fig.II.6-Type de revêtement en Titan [32].

• Aptitude des revêtements

Al_2O_3 : Pour la résistance à la chaleur et à l'usure en cratère élevée

$Ti(C, N)$: Pour l'adhérence sur le substrat et la résistance de l'arête de coupe

- Applications

Les nuances avec revêtement PVD sont recommandées pour leurs arêtes à la fois tenaces et vives. Elles sont aussi particulièrement bien adaptées à l'usinage de matières collantes. Leurs champs d'applications sont courants ; ils incluent les fraises monobloc en bout et les forets monobloc ainsi que la majorité des nuances pour les gorges, le filetage et le fraisage.

Les nuances à revêtement PVD sont aussi très largement utilisées pour les applications de finition ainsi que pour la plaquette centrale des forets à plaquettes indexables.

Applications principales

+ Des applications qui exigent une acuité de l'arête de coupe et une faible résistance à l'usure, une petite épaisseur de copeau

+ Utilisable pour de faibles avances

Remarque :

De préférence utilisée pour $(TiAl)N$ et TiN .

- Caractéristiques principales

+ Possibilité de revêtement d'angles vifs

- + Arête de coupe rectifiée
- + efforts/contrainte
- + Pas de réaction avec le substrat
- faible adhérence (liaison) moins bonne que CVD
- épaisseur de revêtement non uniforme

Applications

Les nuances avec revêtement CVD sont le premier choix dans une grande variété d'applications où la résistance à l'usure est importante. Il s'agit d'applications de tournage général et d'alésage dans les aciers pour lesquelles les revêtements CVD épais apportent une meilleure résistance à l'usure en cratère, d'applications de tournage d'aciers inoxydables et d'applications de fraisage de matières ISO P, M et K. en perçage, les nuances CVD sont généralement utilisées sur la plaquette périphérique [32].

Applications principales:

- + Des applications qui exigent une bonne résistance à l'usure
- + Épaisseur des copeaux moyenne à élevée utilisable pour de fortes avances

Remarque :

De préférence utilisée pour Ti(C, N), Al₂O₃ et TiN.

- Caractéristiques principales

- + Épaisseur de revêtement uniforme
- + Revêtement épais et résistant à l'usure
- + Bonne adhérence (transition)
- nécessite des arêtes arrondies
- pression.

N.B.

Pour plus de détails sur les PVD et CVD voir S.V.P. le chapitre IV

II.4.2.2 Carbure cimenté

- Définition et propriétés

Le carbure cimenté est un produit de la métallurgie des poudres. Il est composé de particules de carbure de tungstène (WC) mélangées à un liant riche en cobalt métallique (Co). Les carbures cimentés utilisés pour la coupe des métaux comportent plus de 80 % de WC en phase solide.

D'autres carbonitrures cubiques peuvent aussi être utilisés, surtout dans les nuances frittées gradients. Le corps en carbure cémenté est formé soit par pressage de poudre, soit par moulage par injection. Il est ensuite fritté pour atteindre sa pleine densité [33].

La taille des grains de carbure (**WC**) est le paramètre le plus important pour la ténacité et la dureté des nuances non revêtues. Plus le grain est fin, plus la nuance est dure, pour une teneur en liant constante.

La teneur en **liant cobalt** et sa composition contrôle la ténacité et la résistance à la déformation plastique de la nuance. À taille de grain égale, plus la teneur en liant est élevée, plus la nuance est tenace et plus elle est sensible à la déformation plastique. Si la teneur en liant est trop faible, le matériau devient friable [33].

Les carbonitrures cubiques, ou phase γ sont en général ajoutés pour augmenter la résistance à chaud et pour former des gradients figure.II.7.

Les gradients servent à améliorer à la fois la résistance à la déformation plastique et la ténacité d'arête. Les carbonitrures cubiques concentrés dans l'arête améliorent la dureté à chaud. Un substrat avec un liant riche en carbure de tungstène au-delà de l'arête réduit la formation de fissures et des fractures dues au martèlement des copeaux.

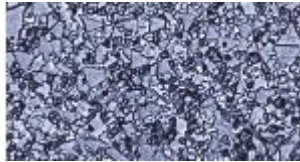


Fig.II.7-Les carbonitrures cubiques [33].

- Grain WC de taille moyenne à grosse

Une taille de grain carbure moyenne à grosse confère au carbure cémenté une dureté à chaud et une ténacité élevées. Avec des revêtements CVD ou PVD, ces substrats permettent de décliner des nuances pour tous les champs d'applications figure II.8.



Fig.II.8-Grain WC de taille moyenne à grosse [33].

- Grain fin et micro-grain

Les substrats carbure micro-grain servent à créer des arêtes vives avec revêtement PVD augmentant leur résistance. Les nuances de ce type ont aussi une très bonne résistance aux charges thermiques et mécaniques cycliques. Elles sont beaucoup utilisées pour les forets carbure monobloc, les fraises en bout carbure monobloc, les plaquettes de tronçonnage et gorges, le fraisage et la finition figure II.9.

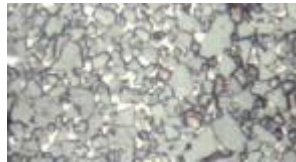


Fig.II.9-Grain fin et micro-grain [33].

- Carbure cimenté gradient

L'avantage des propriétés doubles des gradients est exploité conjointement avec des revêtements CVD pour produire des nuances de premier choix pour le tournage, le tronçonnage et les gorges dans les aciers et les aciers inoxydables.

II.4.2.3 Carbure cimenté non revêtu (HW)

HW Alliages durs sans revêtement, contenant principalement des carbures de tungstène (WC) [35].

- Définition et propriétés

Les alliages durs sans revêtement (figure II.10) constituent une très petite partie de toute la gamme des matériaux des outils. Ces alliages sont ou "non mélangés", constitués uniquement de carbures de tungstène et de cobalt (WC / Co), ou ils ont une très grande portion de cubes carbonitrures.

Ils sont fabriqués selon la technique de métallurgie des poudres par frittage et ils sont constitués :

– de substances dures 60 à 95 % du carbure) qui donnent la dureté et donc la résistance à l'usure.

Elles se composent de carbure de tungstène (WC) phase (γ), de carbure de titane (TiC), de carbure tantale (TaC) et de carbure de niobium (NbC) (phase γ) [33].

– de substances liantes qui donnent la ténacité au carbure. La plus employée est le cobalt (Co) car il dissout facilement les différents carbures (phase β) [35].

On obtient différentes nuances de carbures en faisant varier le pourcentage des substances dures et liantes. Ces nuances présentent des tenues plus ou moins importantes à l'usure (selon la dureté) et aux chocs (selon la ténacité) en fonction de l'utilisation prévue.

La résistance à la chaleur et la conductivité thermique dépendent :

- de la taille des grains WC ;
- du % de Co ;
- du contenu de la phase γ



Fig. II.10-Alliages durs sans revêtement [34].

Domaines d'utilisation

Les domaines typiques d'utilisation - le traitement des alliages réfractaires et les alliages à base de titane, ainsi que le traitement de tournage de matériaux trempés à basse vitesse.

La période de la résistance des plaquettes des alliages sans couverture est très faible. Mais l'usure rapide de la plaquette peut être compensée par l'effet d'auto-affûtage des bords.

II.4.3 Cermets (HT, HC)

HT Alliages sans carbure de tungstène (cermets) contenant principalement des carbures (TiC) ou des nitrures (TiN) de titane ou les deux, ensemble; **HC** Alliages solides ci-dessus, mais revêtu [33].

Définition et propriétés

Le cermet est composé de carbure cémenté avec particules dures à base de titane figure II.11. Le nom cermet est composé à partir du mot céramique et du mot métal. À l'origine, les cermets étaient des matériaux composés à base de carbures de titane (TiC) et liasse de nickel. Alors les cermets modernes ne contiennent plus de nickel, et elles ont une structure basée sur des particules de carbonitride de titane Ti (C, N), une seconde phase solide de (Ti, Nb, W) (C, N) et une liasse de cobalt riche en tungstène.



Fig. II.11-Cermets (HT, HC) [34].

Le Ti(C, N) apporte une meilleure résistance à l'usure à la matière, la seconde phase solide augmente la résistance à la déformation plastique et la teneur en cobalt contrôle la ténacité.

Par rapport au carbure cémenté, le cermet possède une meilleure résistance à l'usure et une tendance réduite au collage (l'accumulation de métal sur la face d'attaque de coupe). Mais il a aussi une moins bonne résistance à la compression et aux chocs thermiques. Les matières cermets peuvent aussi avoir un revêtement PVD pour une meilleure résistance à l'usure figure II.12 [36].

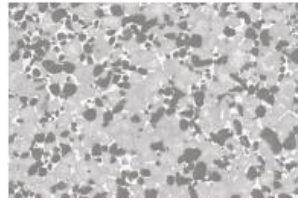


Fig. II.12-matière cermet [36].

Les matières cermet s'utilisent dans les applications avec des matières collantes où le risque d'arête rapportée est élevé. Leur schéma d'usure avec auto affûtage permet de conserver des forces de coupe réduites même après un temps de coupe prolongé. Dans les opérations de finition, la durée de vie d'outil est longue et les tolérances sont serrées. Les états de surface obtenus sont brillants.

Les applications typiques sont la finition des aciers inoxydables, des fontes nodulaires, des aciers bas carbones et des aciers ferritiques. Les cermets peuvent aussi servir pour résoudre les problèmes dans toutes les matières ferreuses.

Les cermets peuvent également être considérés comme une solution optimisée pour le traitement de tous les métaux ferreux.

Recommandations:

- Faible avance et faible profondeur de coupe.
- Changement d'arête lorsque l'usure en dépouille atteint 0,3 mm.
- Ne pas utiliser d'arrosage afin d'éviter les fissures thermiques et les fractures période.

Exemple de cermet

- **GC1525** Cermet robuste avec revêtement pour le tournage sous conditions coupe intermittente.
- **CT5015** Cermet résistant à l'usure pour le tournage en continu.
- **CT530** Alliage de fraisage offrant une surface brillante.
- **CT525** Alliage pour le traitement de finition et de rainurage.

II.4.4 Céramiques (CA, CN, CC);

Définition et propriétés

Tous les outils de coupe céramique ont une excellente résistance à l'usure à grande vitesse de coupe. Il existe toute une gamme de nuances céramiques pour une grande variété d'applications figure II.13. [37].



Fig. II.13-Céramiques (CA, CN, CC) [34].

II.4.4.1 Les céramiques à base d'oxydes sont basées sur l'oxyde l'alumine (Al_2O_3), additionnés de zircon (ZrO₂) afin d'inhiber la formation de fissures. Ce matériau a une très grande stabilité chimique, mais il manque de résistance aux chocs thermiques.

- **Les céramiques mélangées** sont renforcées par des particules avec l'ajout de carbures cubiques ou de carbonitrures (TiC, Ti(C,N)). Elles ont une meilleure ténacité et une bonne conductivité thermique figure II. 14.

- **Les céramiques à whiskers** contiennent des bâtonnets de carbure de silicium (SiC_w) qui renforcent considérablement leur ténacité et autorisent l'utilisation d'un arrosage. Les céramiques à whiskers sont idéales pour l'usinage des alliages à base nickel figure II.15.

- **Les céramiques au nitrure de silicium** (Si_3N_4) sont un autre groupe de céramiques. Leurs cristaux allongés les renforcent et leur confèrent une ténacité élevée. Les nuances au nitrure de silicium conviennent à l'usinage des fontes grises, cependant, leur manque de stabilité chimique limite leur utilisation dans d'autres matières figure II.16.

Les nuances Sialon (nitrure de silicium et d'aluminium) combinent la résistance des céramiques au nitrure de silicium et une meilleure stabilité chimique. Les nuances sialon sont idéales pour l'usinage des superalliages réfractaires.



Fig.II.14-Céramiques mixtes Renforcées [37].



Fig.II.15-Céramiques renforcées avec des cristaux filiformes [37].



Fig.II.16-Céramiques à base de nitrure de silicium [37].

- Domaines d'application

Les nuances céramiques conviennent à une grande variété d'applications et de matières. Les applications les plus courantes sont le tournage à grande vitesse, mais ces nuances conviennent aussi à l'usinage de gorges et au fraisage. Les propriétés spécifiques des nuances céramiques autorisent une productivité élevée si elles sont appliquées correctement. Les applications et la mise en œuvre des nuances céramiques à bon escient sont des critères importants pour la réussite. Les limites générales des céramiques incluent la résistance aux chocs thermiques et la ténacité.

Exemples de céramique

CC620 Finition à grande vitesse des fontes grises dans des conditions stables à sec.

CC6050 Céramique mélangée pour la finition légère continue dans les matières trempées.

CC650 Céramique mélangée pour la finition à grande vitesse des fontes grises et des matières trempées ainsi que pour les opérations de semi-finition dans les superalliages réfractaires si les besoins en ténacité sont peu élevés [37].

II.4.5 Nitrure de bore cubique polycristallin

- Définition et propriétés

Le nitrure de bore cubique polycristallin, ou CBN, est un matériau avec une excellente résistance à chaud. Il peut être utilisé à très grande vitesse de coupe. Il possède aussi une bonne résistance aux chocs thermiques et une ténacité élevée, Le CBN se présente généralement sous la forme d'une pointe qui est brasée sur un support de carbure voir la figure II.17.

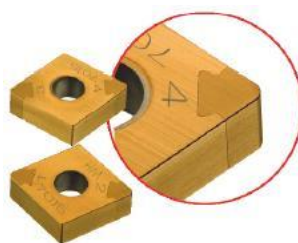


Fig.II.17-Présentation du CBN sur un support [37].

Les nuances CBN modernes sont des matériaux composites à base de céramique avec une teneur en CBN de 40 à 65 %. Le liant céramique augmente la résistance à l'usure du CBN qui serait sujet à l'usure chimique autrement. Un autre groupe de nuances est constitué par les nuances à forte

teneur en CBN, de l'ordre de 85 à 100 %. Ces nuances peuvent contenir un liant métallique pour améliorer leur ténacité [38].

Les plaquettes CBN ont un insert CBN brasé sur une plaquette en carbure cimenté. La technologie Safe-Lok assure la stabilité des inserts CBN sur les plaquettes négatives [38].

Domaine application

Les nuances CBN sont très utilisées pour le tournage de finition des aciers trempés d'une dureté supérieure à 45 HRc. Pour les matières d'une dureté supérieure à 55 HRc, le CBN est le seul matériau de coupe capable de remplacer les méthodes traditionnelles de rectification. Dans les aciers plus doux, d'une dureté inférieure à 45 HRc, la résistance à l'usure du CBN est moins bonne en raison de la présence d'une plus grande quantité de ferrite dans la matière voir la figure II.18.

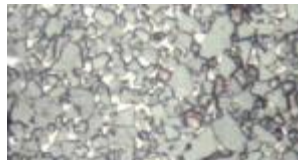


Fig.II.18-Les nuances CBN [38].

Le CBN s'utilise aussi pour l'ébauche des fontes grises à grande vitesse, tant en tournage qu'en fraisage.

Exemple de CBN

CB7015 Nuance CBN à revêtement PVD avec liant céramique pour le tournage continu ou légèrement interrompu dans les aciers trempés.

CB7025 Nuance CBN avec liant céramique pour coupes interrompues et coupes exigeantes en ténacité dans les aciers trempés.

CB7050 Nuance à forte teneur en CBN avec liant métallique pour coupes fortement interrompues dans les aciers trempés et la finition des fontes grises. Revêtement PVD.

II.4.6 Diamant polycristallin PCD

- Définition et propriétés

Le PCD est un matériau composé à partir de particules de diamant à grains fins de diamètres compris entre 5 et 30 μm , liées avec un liant métallique. Le diamant est le plus dur de tous les matériaux, et donc le plus résistant à l'usure par abrasion. Utilisé pour les outils de coupe, il offre une

bonne résistance à l'usure, mais il manque de stabilité chimique à haute température, en outre il se dissout facilement sur le fer voire la figure II.19. [39].

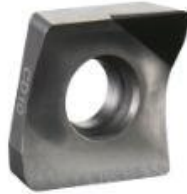


Fig.II.19-Diamant polycristallin PCD [34].

- Applications

Les outils PCD sont réservés aux matières non ferreuses telles que les aluminiums à forte teneur en silicium, les matières composites à matrice métalliques (MMC) [a] et les plastiques renforcés à la fibre de carbone (CFRP). Le PCD peut aussi être utilisé pour la super finition du titane avec arrosage abondant.

Exemple de PCD:

CD10 Nuances PCD pour le tournage et le fraisage semi-finition à finition des matières non ferreuses ou non métalliques.

CD10 Plaque avec des inserts de PCD pour la finition et le traitement semi-finition des métaux non ferreux et des matériaux non métalliques de tournage et de fraisage.

II.5 Conditions d'utilisation des matériaux pour outils de coupe

Les conditions d'utilisation des matériaux de coupe sont résumées dans le tableau II.3 ces conditions ont été choisies de façon à conférer à l'ensemble outil/matière une relative stabilité. L'usinage des aciers durcis par trempe nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à haute température, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro-grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie [40].

Les conditions optimales d'usinage pour un couple outil-matière donné ne sont pas faciles à déterminer. Elles doivent être établies par une série de tests rigoureux. La figure II.20 présente les matériaux des outils pour une exploitation dans le tournage des matériaux durs, ainsi la figure II.21 présente un éclairage sur les aptitudes d'utilisation afin de montrer l'interrelation résistance à l'usure et résilience [41].

Tableau II.3 Comparaison et emploi des différents types de matériaux pour outils en usinage [24].

Matériau	Opération			Matières à usiner		Remarques
	Travail aux chocs	Ébauche	Finition	Bons résultats	Résultats médiocres	
Acier rapide	+++	+	+++	Alliages légers, fontes, aciers inoxydables, titane	Matériaux durs	Usinage de matériaux qui nécessite une bonne acuité d'arête.
Acier rapide revêtu	++	++	+++	Alliages et fontes en fraisage deux tailles de petit diamètre		Une bonne durée de vie pour des outils à arête fine. Ces outils existent surtout en fraisage et en perçage.
Carbure métallique	++	++	++	Gamme de nuances adaptée à la plupart des matériaux		Emploi limite dans le cas des matériaux à usiner de très grande dureté.
Carbure revêtu	+	+++	++	Aciers, fontes, alliages réfractaires		Pour l'ébauche associée au revêtement CVD.
Carbure micrograin revêtu		+	+++	Aciers traités, fontes aciers alliés, aciers inoxydables		Dureté importante et résistance convenable. Certaines nuances résistent mal aux chocs. Revêtement PVD.
Carbure de titane monobloc		+	+++	Aciers au carbone, aciers alliés, fontes	Alliages de titane Alliages légers	Dureté importante - Bonne acuité d'arête Bon état de surface - Mauvaise tenue aux
Cermet			+++	Fontes, Aciers traités $110 < R_m < 160$, daN/mm^2 - Réfractaires	Alliages de titane Alliages légers Aciers inoxydables pour les céramiques	Finition à grandes vitesses - Résistance à l'usure élevée. Bonne tenue à la température Tenue aux chocs aléatoires. Nécessité des machines puissantes et rigides.
Céramiques		+++				
Nitride de bore cubique		+	+++	Aciers trempés, aciers cémentés, fontes trempées		Nuance pure et recommandée pour conditions difficiles
Diamant polycristallin		+	+++	Métaux non ferreux, graphite et composites		Finition et semi-finition.

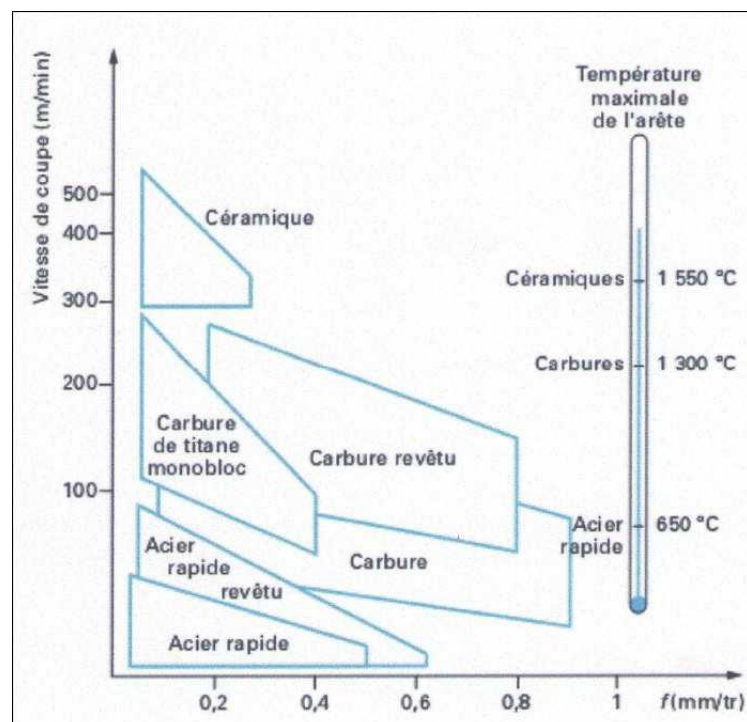


Fig.II.20-Comparaison des matériaux de coupe d'après [24].

Domaines, limites d'utilisation des différents types de matériaux en fonction des paramètres V_c et avance f .

Ce diagramme ci-contre est donné à titre indicatif pour situer les différents domaines d'utilisation des matériaux pour outils.

Il est représentatif des conditions normales d'utilisation de ces outils, en ébauche, pour les aciers et les fontes. Il ne peut être utilisé pour choisir les conditions de coupe.

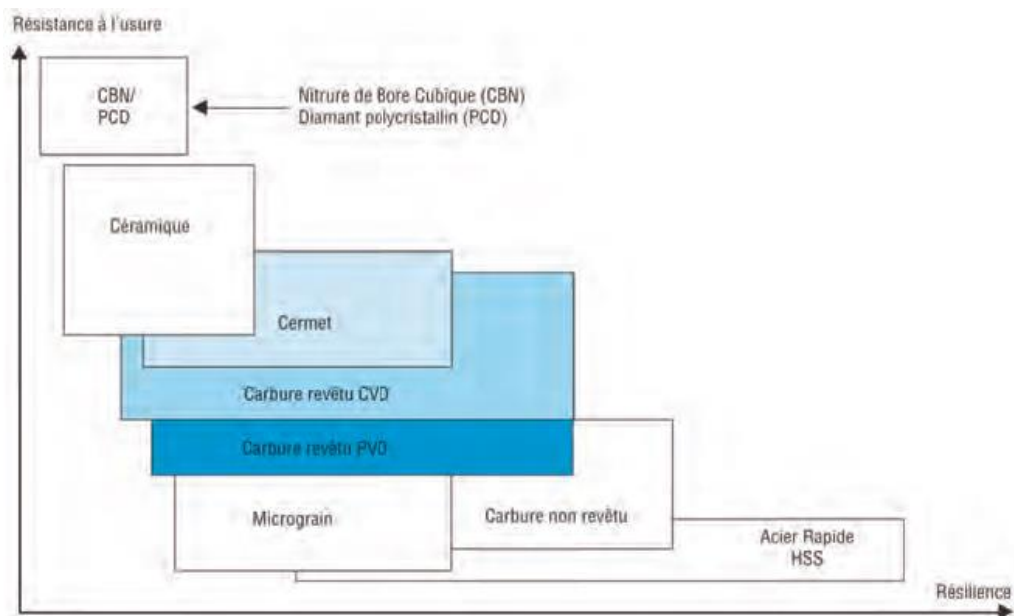


Fig. II.21-Illustration des aptitudes des matériaux à outil [24].

II.6 Conclusion

Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe. En plus des conditions d'utilisation de l'outil, celles-ci sont fonction des propriétés du matériau telles que :

- la dureté pour combattre l'usure,
- la résistance mécanique à chaud pour supporter les hautes températures atteintes durant les opérations de coupe,
- la ténacité pour résister aux chocs dus aux interruptions d'usinages ou aux vibrations,
- l'inertie chimique pour éviter les dégradations de l'outil par réaction avec la pièce usinée (diffusion chimique) et avec le milieu environnemental de l'usinage (oxydation).

Généralement ces propriétés sont interdépendantes, et l'amélioration de l'une d'entre elles peut se faire au détriment des autres. Sur la Figure II.22, l'outil de coupe idéal est symbolisé par un pentagone qui passe par les maximas des qualités nécessaires à un bon outil [42].

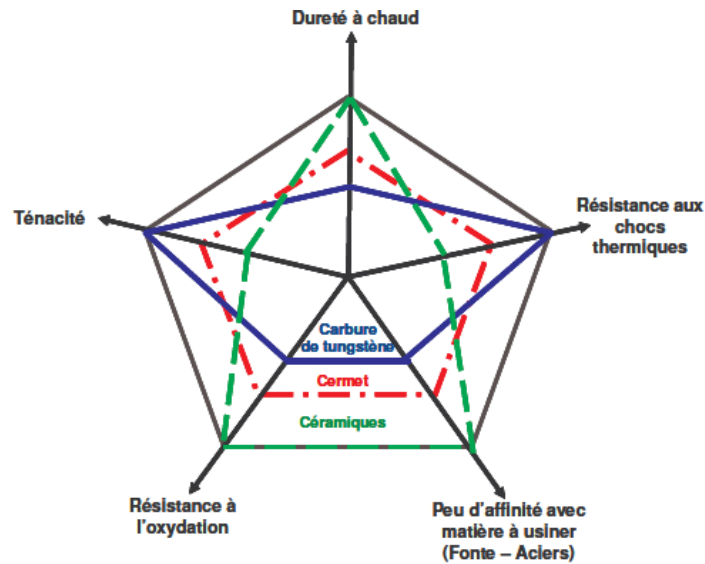


Fig.II.22-Positionnement comparative des propriétés de différents matériaux de coupe [42].

Ce schéma montre que la céramique est un bon complément du carbure de tungstène pour la tenue thermique, le cermet est en position médiane. Les outils carburés ont une ténacité élevée, mais une dureté faible par rapport aux matériaux avancés tels que les outils CBN ou céramiques.

Chapitre III

*Procédures de fabrication
des plaques de coupe.*

III.1 Introduction

La plaquette avec une forme carré, triangulaire ou rhombique, résiste à des températures extrêmes, à l'usure, aux déformations, est très tenace et peut s'attaquer à des métaux très durs durant des heures. La petite plaquette de coupe jetable bien sûr. Elle fait partie depuis des lustres de l'attirail classique de tout atelier de mécanique. Elle est si banale que l'on n'imagine pas la complexité de son processus de conception et de fabrication. La CAO (conception assistée par ordinateur) est devenue indispensable pour détecter la forme la plus adaptée. Mais un effort encore plus important est nécessaire en fabrication [43].

Pour mieux comprendre la complexité du processus, prenons l'exemple des plaquettes les plus traditionnelles, celles en carbure cémenté. Produit de la métallurgie des poudres, le carbure est fabriqué selon un processus minutieusement contrôlé. Sa structure et sa composition sont très importantes pour obtenir les performances attendues en usinage.

III.2 Procédure d'élaboration des plaques en carbure de tungstène

La fabrication des plaques en carbure comporte plusieurs étapes : production de la poudre, pressage des ébauches, frittage, traitement des plaquettes et revêtement. Chacune pourrait faire l'objet d'un livre entier ! Contentons-nous de savoir qu'en utilisant différents types de poudre de tungstène obtenue par réduction, on peut produire toute une variété de nuances adaptées à chaque type d'applications.

Les carbures cémentés ainsi que les cermets sont élaborés selon un processus de métallurgie des poudres Figure III.1. Les constituants de base sont introduits sous forme de poudres fines d'une taille de l'ordre du micron. Ces différents carbures, très durs, sont principalement des carbures de tungstène (WC), de titane (TiC), de tantale (TaC), de niobium (NbC)... Le titane peut également être utilisé sous forme de nitrure TiN. Le liant utilisé est essentiellement du cobalt (du nickel pour les cermets) [44].

Après pesage, ces poudres sont mélangées par broyage, puis compactées par pressage dans des presses utilisant des matrices spéciales. Après pressage, les plaquettes présentent une porosité proche de 50% en volume. Elles sont ensuite densifiées par un frittage à des températures situées entre 1350°C et 1550°C sous vide ou sous pression en atmosphère gaz neutre.

Pendant le frittage, le carbure de tungstène ainsi que les autres carbures éventuels se mettent en solution partielle dans le liant métallique. L'existence d'un eutectique entre le cobalt, et les carbures, permet de former une phase liquide à une température inférieure à la température de fabrication du cobalt pur [45].

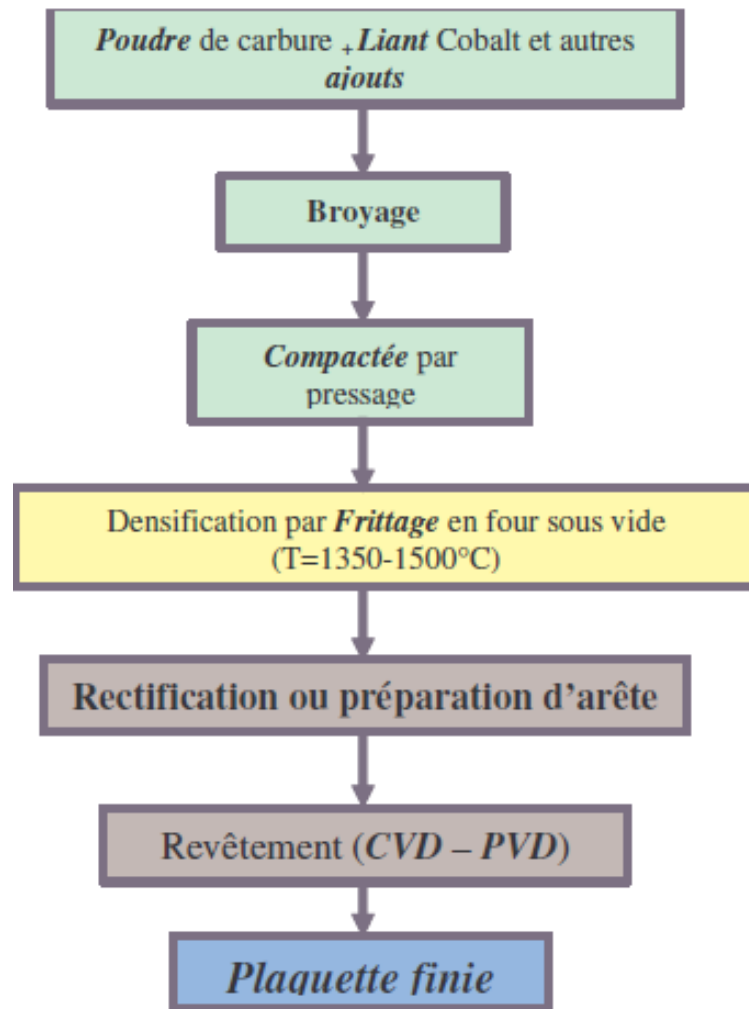


Fig.III.1-Procédure de fabrication du carbure de tungstène [46].

La Figure III.2 présente une synthèse des étapes de fabrication des plaquettes carbure [47]. Après l'opération de pressage, une étape de frittage est réalisée pour élaborer la macro géométrie de l'outil. Cette macro géométrie englobe le brise copeau, proche de l'acuité d'arête dans le cas des géométries de tournage. Les géométries brises copeau sont intégrées lors du pressage. Une coupe transversale, permet d'observer la géométrie et les autres caractéristiques telles que l'angle de coupe ou le listel, intégrées à la plaquette.

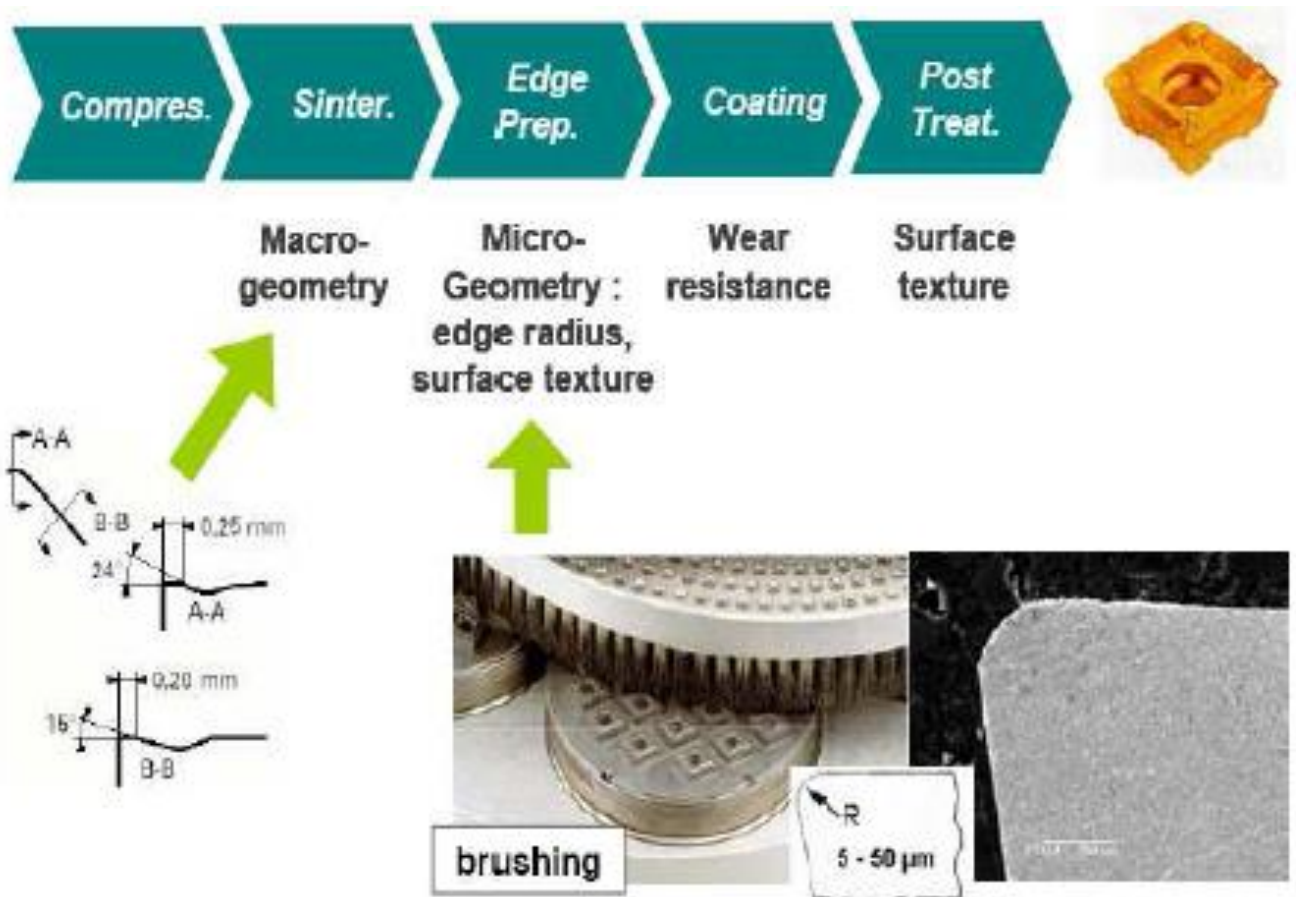


Fig.III.2-Résumé de la fabrication des outils en carbure de tungstène, suivi d'une préparation d'arête et d'un surfaçage [47].

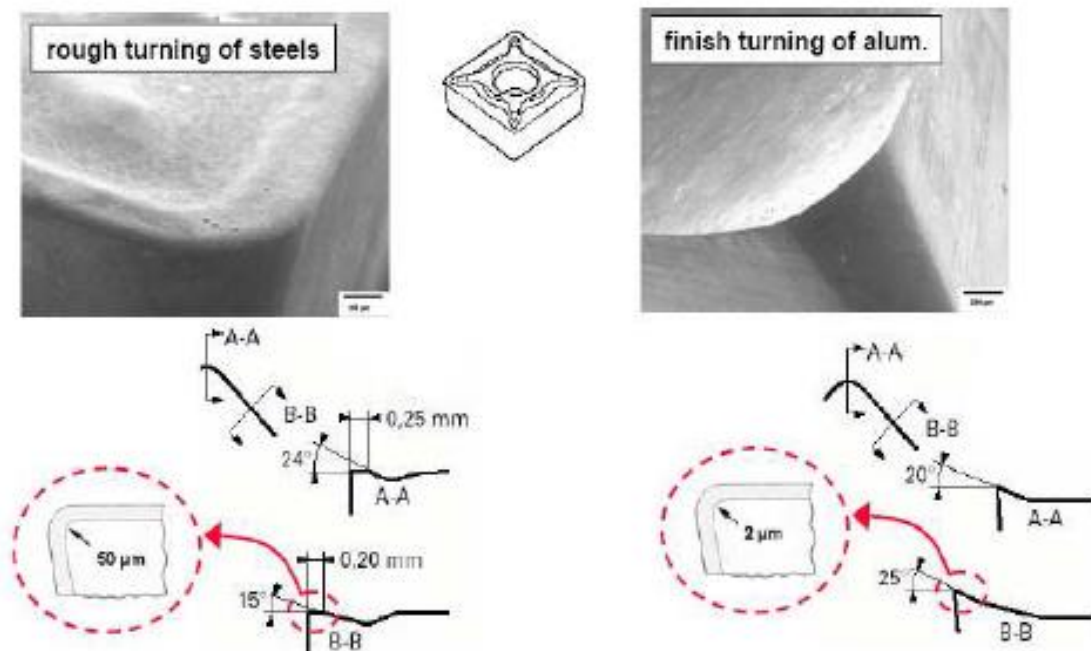


Fig.III.3-Comparaison des préparations d'arête et de la géométrie brise copeau sur deux plaquettes carbure [47].

La Figure III.3 représente une géométrie brise copeau standard sur deux plaquettes carbure employé en tournage avec préparation d'arête. La préparation d'arête observée est fonction de la

matière et de l'opération d'usinage préconisée. Une préparation d'arête de type E est par exemple préconisée pour l'ébauche de l'acier et de type F pour la finition des alliages d'aluminium.

A l'issue de l'opération de préparation, la géométrie des arêtes de coupe peut être modifiée par broissage. Trois formes géométriques différentes de préparation d'arête peuvent être observées (Figure III.4) [48]:

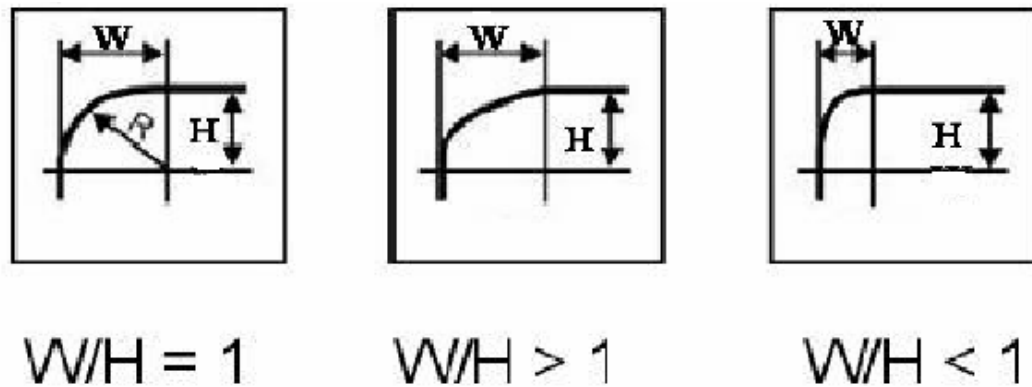


Fig.III.4-Familles de géométries des arêtes préparées. De gauche à droite : arête circulaire unitaire, avec $W/H=1$, suivie d'une arête à forme plate puis une arête en « chute d'eau » [48].

Par modification des paramètres de la machine, de la composition et de la direction des brosses, différentes formes géométriques peuvent être réalisées. Ces différentes formes géométriques, corrélées à la géométrie brise copeau, jouent un rôle sur l'écoulement du copeau, les sollicitations mécaniques, et par la suite, sur le développement de l'usure.

III.3 Structure des outils (WC-Co)

La composition chimique du carbure et la taille des granulométries conditionnent fortement les propriétés mécaniques et physiques des outils carbures. D'où l'importance de bien appréhender la métallurgie d'une plaquette de coupe Figure III.5. Trois phases principales sont présentes dans les métaux durs [49]:

- la phase α composée de grains monophasés de carbure de tungstène (WC), est une des phases dures.
- la phase β (ou phase métallique liante) est principalement composée de cobalt. C'est cette phase qui donne la ténacité au carbure cimenté.
- la phase γ (ou phase cubique) regroupe essentiellement les autres carbures à base de titane, tantale. Cette phase améliore la tenue à chaud du carbure [49].

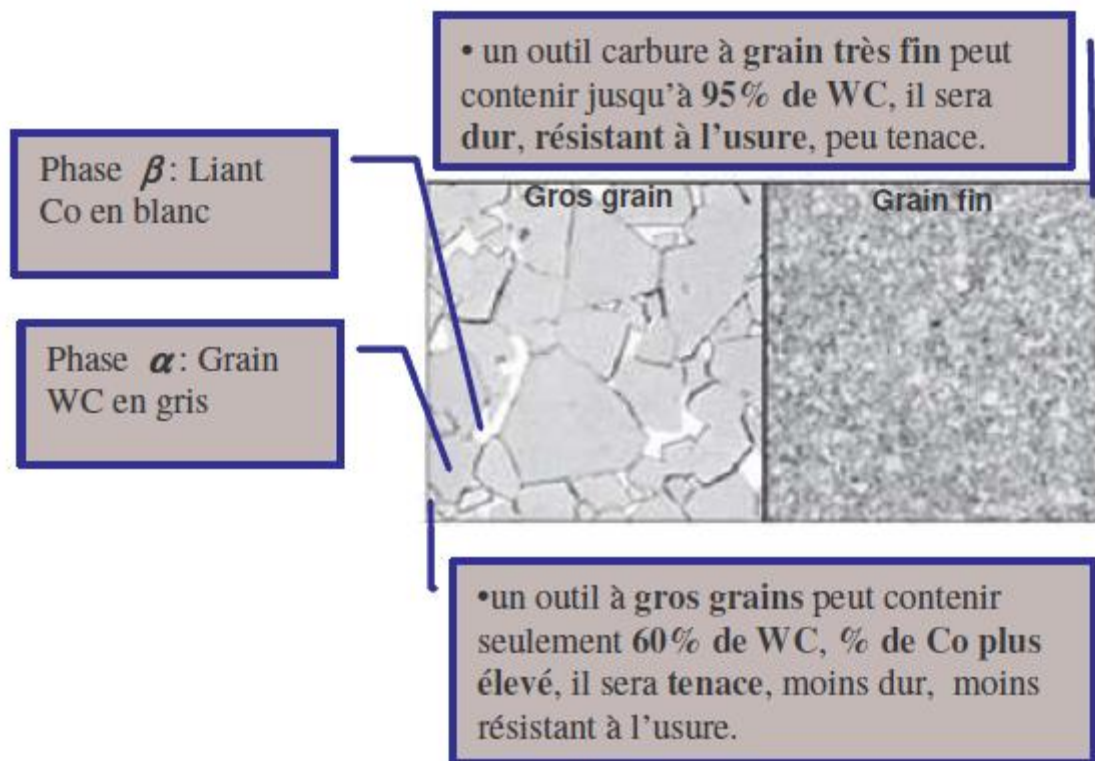


Fig.III.5- Microstructures de plaquette carbure après frittage. Relation entre la grosseur des grain et le % de Co dans le carbure cémenté [50].

III.3.1 Le métal dur fritté : Présentation figure III.6 :

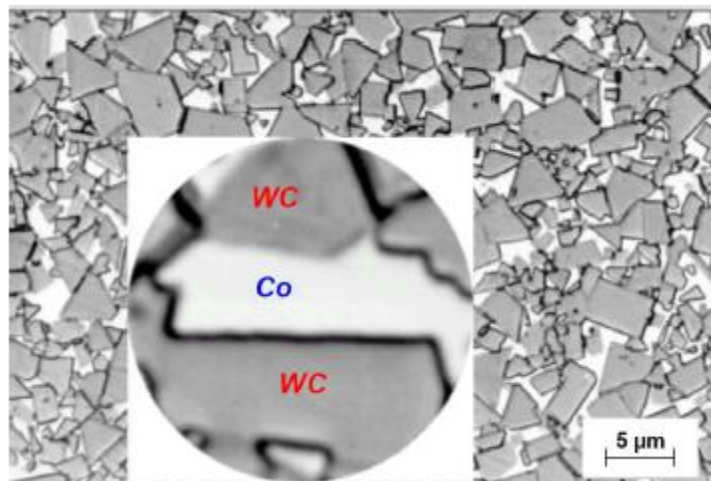


Fig.III.6-Microstructure du métal dur WC/Co [51].

Le métal dur fritté est un mélange de carbure de tungstène et de cobalt. Le métal dur fritté est produit suivant la filière de la métallurgie des poudres (La métallurgie des poudres est un processus permettant de réaliser des pièces aux cotes finies, sans usinage et donc sans perte de matière) qui n'implique, par opposition à la métallurgie classique, jamais la fusion complète des constituants [51].

Les deux éléments principaux du métal dur fritté étudié au cours de ce travail sont le tungstène, plus précisément le carbure de tungstène et le cobalt.

III.3.1.1 Données techniques

Ci-dessous, un tableau III.1 reprenant toutes les caractéristiques physicochimiques des éléments du métal dur fritté.

Table III.1 Les caractéristiques physicochimiques des éléments du métal dur fritté [51].

Eléments \ Caractéristiques	Carbure de tungstène	Tungstène	Cobalt
Formule moléculaire	WC	W	Co
Masse molaire (g/mol)	195,9	183,85	58,93
Densité (g/cm ³)	15,8	19,3	8,9
Point de fusion (°C)	2870	3422	1495
Point d'ébullition (°C)	6000	5555	2870
Structure cristalline	hexagonale	cubique centrée	cubique face centrée
Dureté Vickers (Hv)	1550	500	320
Module de Young (GPa)	720	407	290
Module d'élasticité (GPa)	550	410	210
Conductivité thermique (W/mK)	84,02	174	100
Résistance à la traction (GPa)	0,3448	1,510	0,8
Couleur	gris métallique	gris acier	argenté

III.3.2 Composition et caractéristiques

Les métaux durs se distinguent par une très grande dureté et une résistance à la rupture. Ces caractéristiques sont obtenues grâce au carbure de tungstène pour la dureté (résistance à l'usure et rigidité) et au cobalt pour la résistance à la rupture (ténacité et ductilité).

Les principaux paramètres permettant d'optimiser les caractéristiques relatives à l'application voulue sont donc la **teneur en cobalt** et la taille de **grain du carbure de tungstène** [52].

La dureté augmente quand la teneur en cobalt et la taille des grains de WC diminuent. La dureté d'un matériau est définie comme sa résistance à la pénétration d'un autre matériau plus dur (HV : dureté de Vickers qui se mesure avec une pyramide en diamant). Le graphique ci-dessous illustre ce comportement.

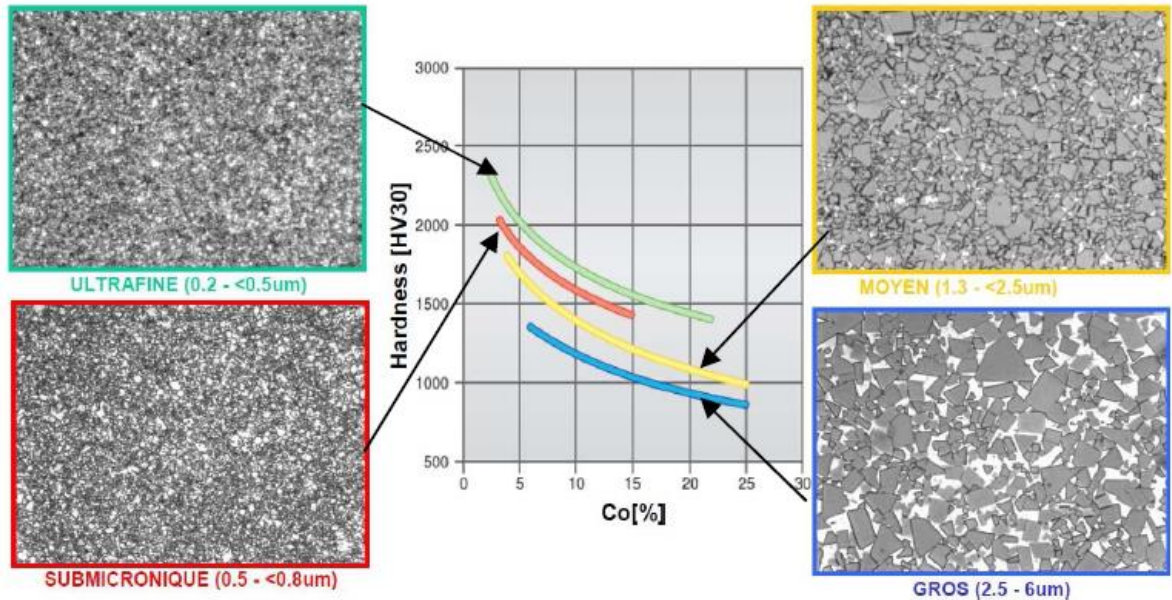


Fig.III.7- Relation entre la dureté, le pourcentage de Co et la taille des grains de carbure [52].

La ténacité (La ténacité caractérise le comportement d'un matériau à la rupture en présence d'une entaille) augmente quand la teneur en cobalt et la taille des grains augmentent. La teneur en cobalt peut monter jusqu'à 30 % pour obtenir une ténacité de $20 \text{ MPa} \sqrt{m}$. Le facteur racine de m vient d'une relation empirique déterminé par Griffith A. qui relie la contrainte à la racine de la longueur de l'entaille, Le graphique ci-dessous illustre ce comportement [53].

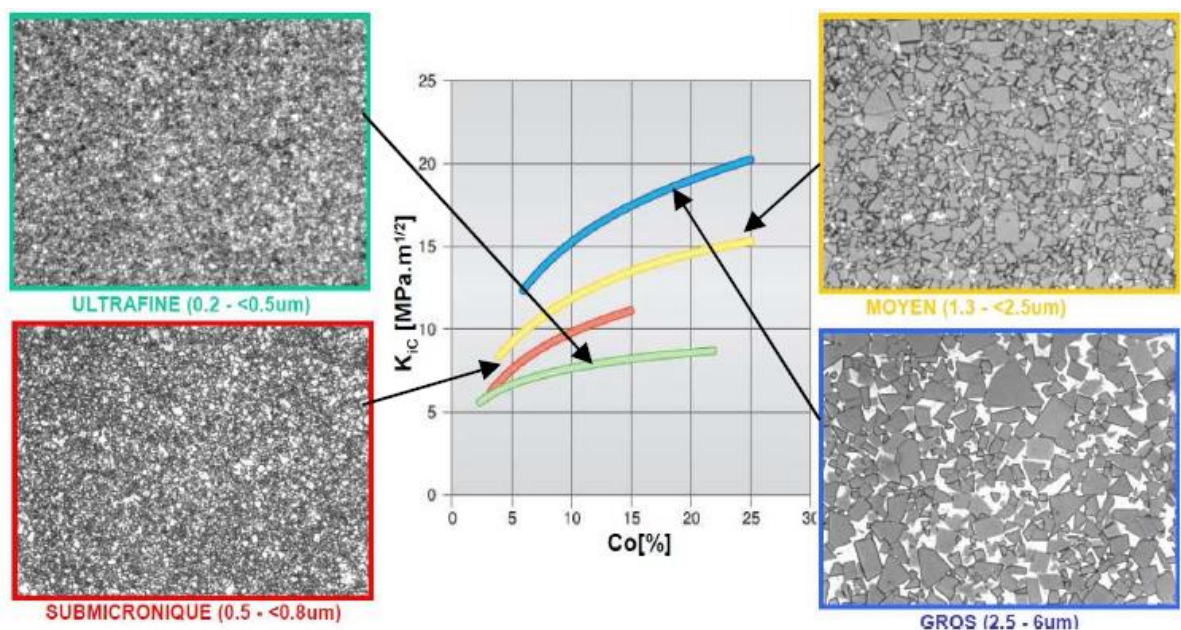


Fig.III.8-Relation entre la ténacité, le pourcentage de Co et la taille des grains de carbure [53].

III.4 Processus de fabrication des plaques de coupe

Les fabricants produisent plusieurs références de pièces en métaux durs, par la métallurgie des poudres, ce qui implique une grande variété de produits demandant des processus de fabrication avec des étapes différentes (Figure III.9).

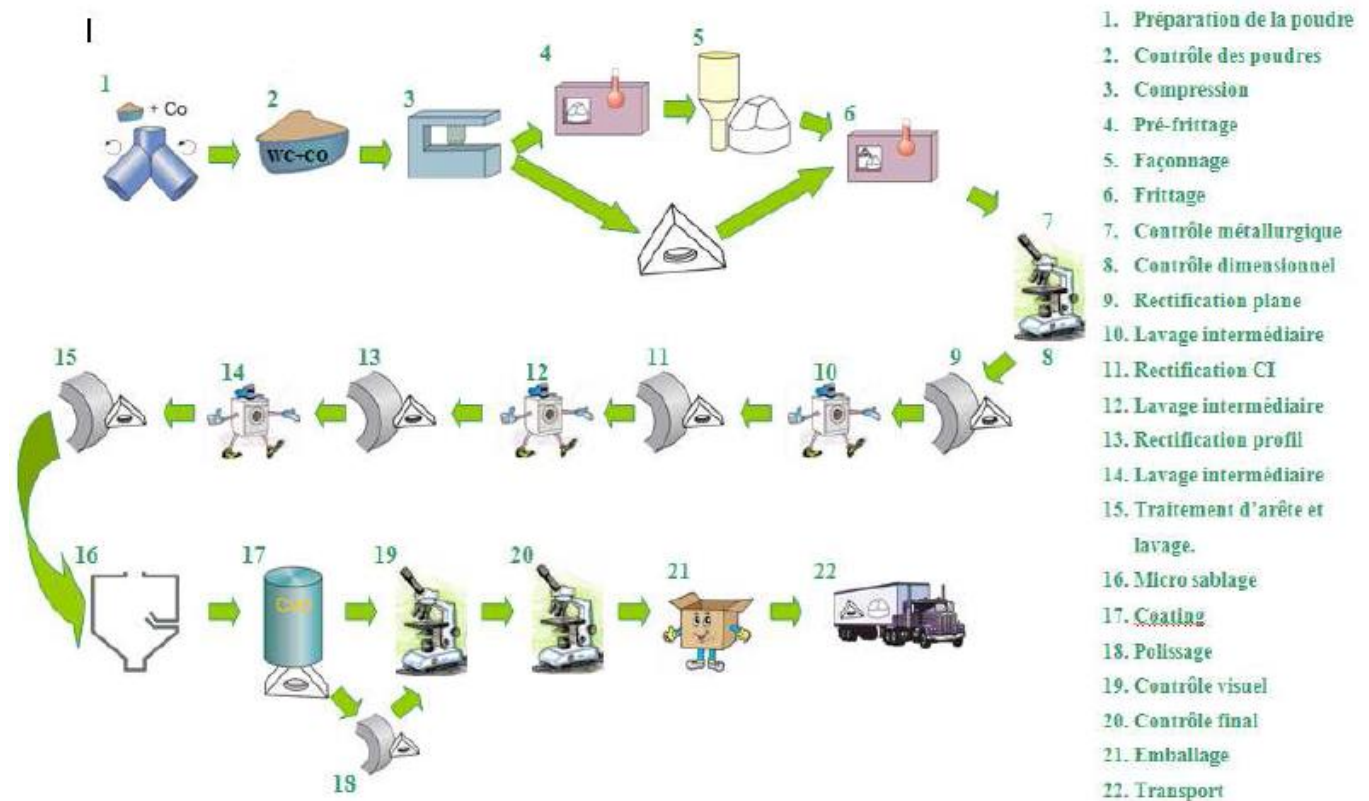


Fig.III.9-Représentation du cycle de fabrication [54].

Les plaques sont produites à partir d'alliages durs d'une douzaine de marques, dont chacun a des caractéristiques distinctives. La base de la production est le principe du pressage des poudres de carbure de tungstène, de titane, de tantale et d'autres métaux durs.

Après le pressage, le mélange est cuit à haute température, obtenant une grande résistance des produits finis. Ensuite, les plaques sont entraînées mécaniquement. A cet effet, un revêtement spécial de nitrure de titane, de carbonitrure de titane, de nitrure de titane-aluminium et d'autres matériaux est appliqué sur les produits interchangeables en plusieurs couches. Le processus de production permet à la sortie de recevoir des produits qui supportent des températures de fonctionnement allant jusqu'à 900 - 1150° C [54].

III.4.1 Préparation de la poudre

Il y a deux composants principaux des plaques de carbure:

- WC= Carbure de tungstène

- Co = Cobalt

Les autres composants utilisés sont le titane, les carbures de tantale et les combinaisons de différents types de poudre en pourcentages différents qui donnent des alliages différents. La poudre sera broyée, séchée et versée dans des récipients, Les procédés de préparation de la poudre des carbures cémentés sont illustrés dans la Figure III.10.

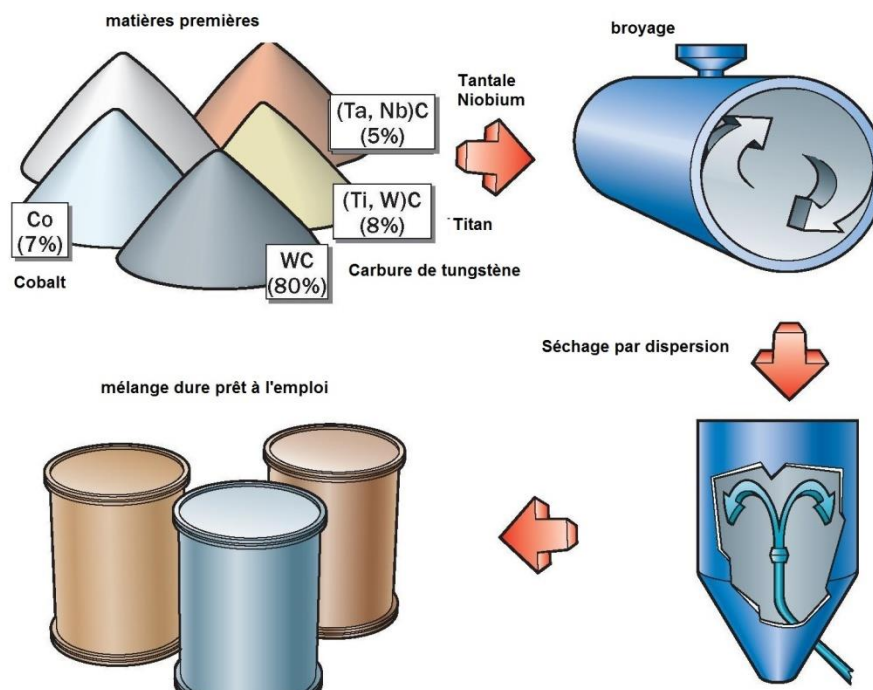


Fig.III.10-Préparation de la poudre WC/Co [55].

Les poudres de cobalt et de carbure de tungstène sont mélangées par broyage en milieu liquide. L'objectif de ce broyage n'est pas de diminuer la taille des grains, mais de casser les agglomérats et d'obtenir un mélange parfaitement homogène. On utilise des agents broyants en carbure cémenté afin d'éviter toute pollution [55].

Un liant organique soluble dans le liquide est ajouté dès l'étape du broyage afin de garantir sa parfaite répartition. Le rôle de ce liant organique est :

- De permettre une étape ultérieure de granulation
- De protéger les poudres de l'oxydation
- De donner une tenue à crû satisfaisante aux comprimés afin de permettre leur usinage.

III.4.2 Séchage-granulation

A l'issue du broyage, le liquide chargé des particules de cobalt et de carbure de tungstène, et dans lequel est dissous ce liant organique, subit une opération de séchage-granulation. Le liquide est pulvérisé en fines gouttelettes dans une chambre de séchage où circule de l'azote chaud.

Les gouttelettes sont séchées, et on récupère des granulés de diamètre variant de 40 à 200 μm , dans lesquels les poudres WC et Co sont intimement liées par le liant organique.

La poudre ainsi granulée est appelée « mélange prêt à l'emploi » (MPE). Les MPE ne sont plus pulvérulents et ceci présente plusieurs avantages [56]:

- Ils peuvent être manipulés sans risque par les opérateurs
- La forme sphérique des granulés confère au mélange une bonne coulabilité d'où des remplissages rapides et homogènes.

La densité apparente des mélanges granulés varie de 2,8 à 3,5 g/cm^3 .

III.4.3 La mise en forme : compression et usinage à crû

Le procédé de mise en forme le plus utilisé est la compression uni axiale en matrice fermée. Cette opération est réalisée sur des presses hydrauliques, mécaniques ou rotatives.

Les presses hydrauliques ont en règle générale des capacités plus importantes (supérieures à 50 tonnes) que les presses mécaniques, mais ont l'inconvénient d'être plus lentes. Les presses rotatives comportent 10 à 30 jeux d'outillages identiques et tournent à la vitesse de 15 à 50 tours par minute, ce qui leur donne une très grande productivité, mais des coûts d'outillage également très importants [57]. Les domaines d'utilisation de ces différentes presses sont donc clairement délimités :

- les presses hydrauliques sont réservées aux pièces présentant une surface comprimée étendue, avec une hauteur réduite comparée à leur surface. Les séries sont en général de taille limitée.
- les presses mécaniques sont les plus utilisées, car elles permettent la compression de pièces de petite ou de moyenne taille. La cadence de frappe varie de 10 à 20 coups par minute, ce qui autorise déjà la réalisation de grandes séries.
- les presses rotatives sont réservées aux très grandes séries et souvent pour des pièces plutôt petites. En effet les coûts importants d'outillage ne peuvent être amortis que sur un très grand nombre de pièces.

La compression en matrice fermée permet un très bon contrôle des dimensions du comprimé : Les cotes sont données par la géométrie de la matrice et par la hauteur comprimée. Par contre, il y a

pendant l'opération de compression des frottements poudre/matrice, qui génèrent un gradient de densité sur le comprimé.

Ces variations de densité donneront des variations dimensionnelles après frittage, et les pièces devront être reprises en rectification si les déformations sont inacceptables pour l'application envisagée. Pour pallier cet inconvénient, on utilise également souvent la compression isostatique à froid en particulier dans le cas de pièces très volumineuses, pour lesquelles ces variations dimensionnelles deviennent trop importantes.

Lors de la compression isostatique, la poudre est introduite dans une chaussette de polyuréthane ou de latex. Après avoir fait un vide étanche, la chaussette est placée dans une enceinte remplie d'eau, où l'on augmente la pression jusqu'à un niveau de compression compris entre 150 et 200 MPa (1500 à 2000 bar).

Ce mode de mise en forme se caractérise par des gradients de densité réduits, mais la géométrie du comprimé n'est pas parfaitement maîtrisée. Aussi il est nécessaire d'usiner le crû avant frittage pour obtenir une parfaite maîtrise des cotes frittées [58].

L'opération de compression se fait par réarrangement des grains les uns par rapport aux autres [59]. La densité des comprimés correspond à environ 52 à 55 % de la densité frittée, soit 7,5 à 8,5 g/cm³ voire la figure III.11.

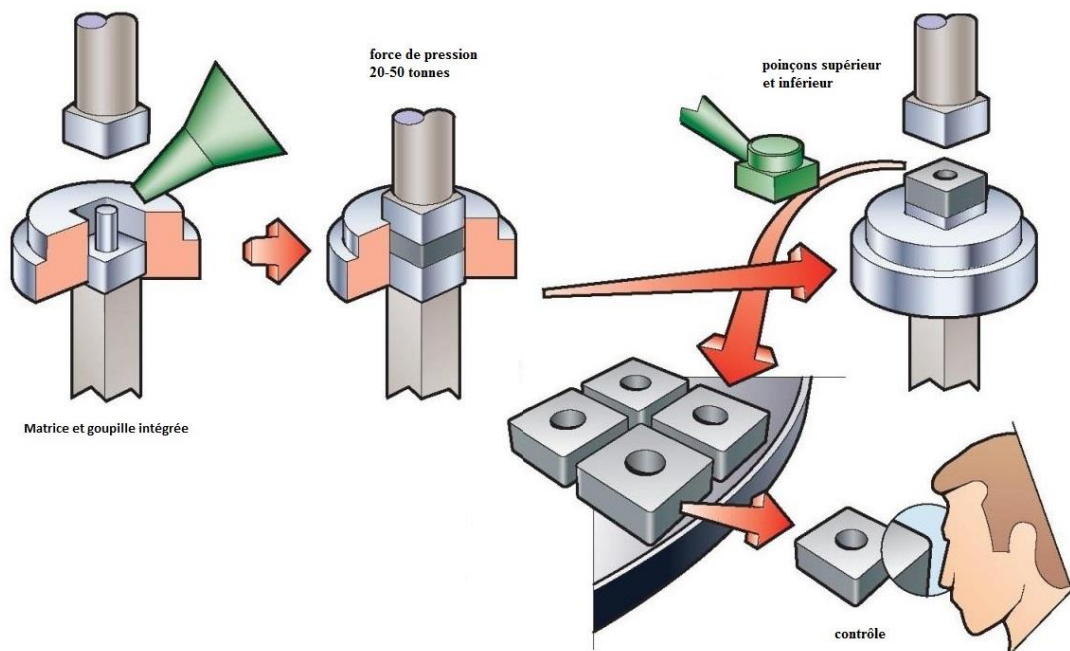


Fig.III.11-Opération de compression de la poudre WC/Co [59].

Les composants suivants sont nécessaires pour l'opération de compression :

- Poinçons supérieur et inférieur
- Goupille intégrée

- Cavité (Creux).

Procédure de pressage

- La cavité se remplit de la poudre
- Les poinçons supérieur et inférieur fonctionnent dans la gamme de 20-50 tonnes
- La plaque est retirée et déplacé par un robot sur un plateau en graphite
- Les échantillons sont choisis au hasard et leurs poids sera vérifiés et contrôler dans le cas ou il ya un de surface où de dimension les ébauches plaques seront corriger à crû.

III.4.4 Frittage d'ébauches compactées

Le processus de frittage comprend les phases suivantes voir la figure III.12:

- Les palettes à plaques sont chargées dans un four de frittage
- La température augmente jusqu'à 1400 °C
- Pendant le processus, le cobalt passe à la phase liquide et il se forme un liant de cobalt
- La plaque diminue en dimensions linéaires de 18 %, ce qui correspond à 50 % du volume voir la figure [60].

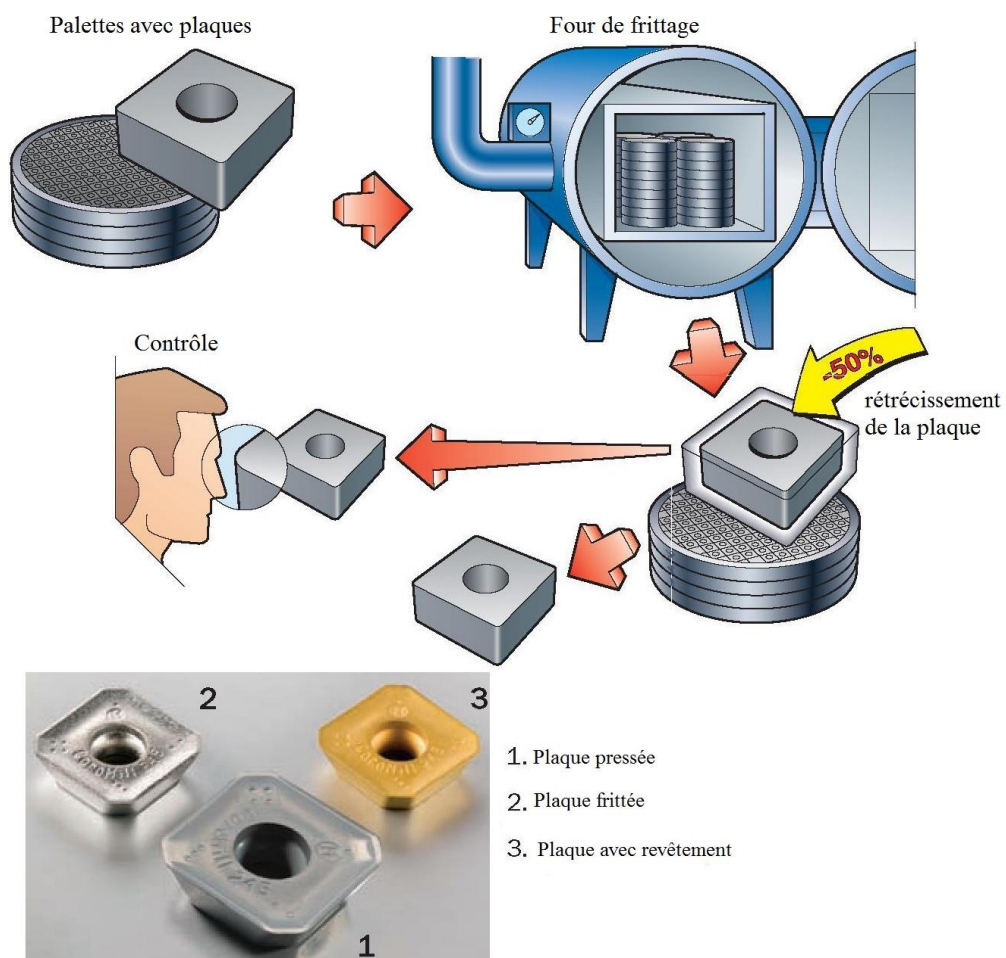


Fig.III.12-frittage des plaquettes [60].

III.4.4.1 Procédure d'élaboration du frittage

III.4.4.1.1 Le déliantage

Il se réalise entre 100 et 450°C sous une atmosphère d'azote ou d'hydrogène selon le liant organique à éliminer. Pendant cette montée en température, le liant se décompose en sous-produits gazeux, qui sont éliminés par la circulation des gaz.

III.4.4.1.2 La montée en température

En fin de déliantage, on réalise un vide primaire, puis on monte en température jusqu'à l'apparition de la phase liquide. Les oxydes de cobalt et de tungstène répartis à l'état de traces sont alors réduits en consommant une partie du carbone libre disponible. Pendant la montée, le carbure de tungstène se dissout dans le cobalt jusqu'à atteindre la solubilité maximale de 16 masse % à 1275°C [61].

A l'apparition de la phase liquide, plus de 80 % du retrait s'est réalisé en phase solide. Un squelette de WC a été formé essentiellement par réarrangement des grains de WC. On note déjà un facettage des grains de WC [61].

III.4.4.1.3 L'apparition de la phase liquide

La fusion de la solution solide Co-WC se produit entre 1275 et 1340 °C, température à laquelle le cobalt est complètement fondu [3]. On fait alors un palier en température afin de s'assurer que toutes les pièces du four passent en phase liquide en même temps, avant de poursuivre la montée.

On casse également le vide avec de l'argon, afin de limiter la cinétique de vaporisation du cobalt. Les mécanismes débutés en phase solide tels que le réarrangement et la dissolution/précipitation du WC s'accélèrent.

III.4.4.1.4 Le palier de frittage

La température de frittage dépend de la composition de la nuance (taille des grains de WC, teneur en cobalt). Elle varie entre 1350 et 1500°C. Après quelques minutes, le carbure est complètement densifié. Seuls quelques pores isolés restent stables. La taille des pores stables dépend de la composition de la nuance [62].

En fin de frittage, les grains de WC ont grossi (mûrissement d'Ostwald) et sont facettés. En plus du mûrissement d'Ostwald, il existe une croissance dite anormale des grains de WC : les plus

petits grains se dissolvent dans la matrice et le WC dissous reprécipite de façon préférentielle sur les grains les plus gros et leur croissance est alors catastrophique [63].

Afin de maîtriser la qualité des frittés, on ajoute d'autres carbures métalliques, qui inhibent ou ralentissent ces phénomènes.

III.4.4.1.5 Le frittage sinterhip

Lorsque le four le permet, on augmente la pression d'argon dans le four jusqu'à 60 à 100 bar. Cette pression supplémentaire permet de réduire les derniers pores stables.

III.4.4.2 Le refroidissement

Il se fait lentement sous argon, jusqu'à température ambiante. Il s'est alors écoulé entre 15 et 48 heures pour un cycle industriel.

Pendant l'opération de frittage, se produit un retrait linéaire de 18 à 20%. Les pièces obtenues sont complètement denses, la porosité résiduelle ne dépassant pas 0,02 vol. % dans la très grande majorité des cas.

III.5 La qualité métallurgique

La masse volumique

La détermination de la densité reste la première opération de contrôle. Elle est faite en suivant la norme ISO 3369 par double pesée dans l'air et dans l'eau. Le but de ce contrôle n'est pas de vérifier l'absence de porosité, mais de constater que l'on a la bonne teneur en cobalt. En effet, la différence de densité entre le cobalt (8,9) et le carbure de tungstène (15,67) permet de détecter immédiatement une erreur de nuance [64].

La teneur en carbone et l'aimantation à saturation

Les deux phases WC-Co coexistent seules dans une fenêtre déterminée de carbone (Figure III.13), dont la largeur est fonction de la teneur en cobalt [65]. Si la teneur en carbone excède la limite supérieure de cette fenêtre, il y a alors présence de carbone libre. Par contre, si la teneur en cobalt est inférieure à la limite basse, il y a formation du composé $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, appelé phase η . Cette dernière phase est très fragilisante. D'une façon générale, et sauf volonté délibérée, la présence de carbone libre et de phase η sont à proscrire.

La mesure de l'aimantation à saturation permet d'estimer très rapidement une faible teneur en carbone : 1% massique de cobalt pur génère une aimantation à saturation de $2,015 \cdot 10^{-6} \text{ T.m}^3.\text{kg}^{-1}$. Mais lorsque la teneur en carbone est insuffisante, le tungstène en excès forme une solution solide avec le cobalt, ce qui diminue cette aimantation. Cette mesure est très rapide et souvent utilisée en contrôle de production. Elle est définie par la norme NF A 95-432.

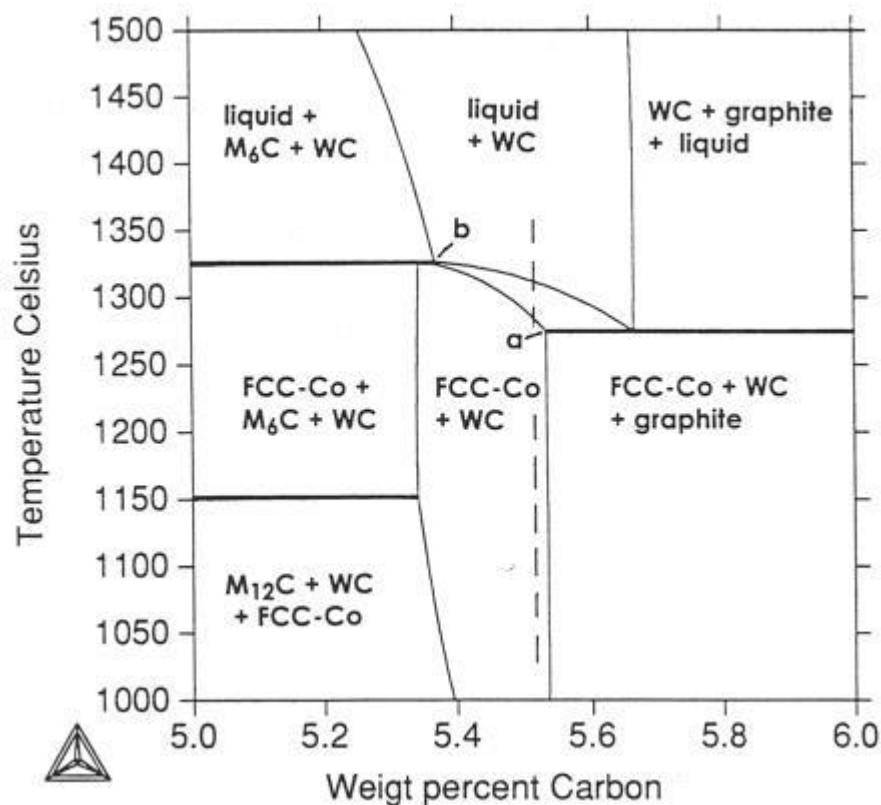


Fig.III.13 Coupe du diagramme ternaire W-C-Co pour un rapport W/C constant d'après [65].

III.6 Conclusion

La fabrication des plaques en carbure comporte plusieurs étapes et elles sont variables dépendant de plusieurs facteurs : la composition des plaques, le matériau à usiner, les conditions de coupe, de prosciel et de la conception assistée par ordinateur. La composition chimique du carbure et la taille des granulométries conditionnent fortement les propriétés mécaniques et physiques des outils carbures.

Les métaux durs se distinguent par une très grande dureté et une résistance à la rupture. Ces caractéristiques sont obtenues grâce au carbure de tungstène pour la dureté (résistance à l'usure et rigidité) et au cobalt pour la résistance à la rupture (ténacité et ductilité).

Les principaux paramètres permettant d'optimiser les caractéristiques relatives à l'application voulue sont donc la teneur en cobalt et la taille de grain du carbure de tungstène.

Il convient de noter que les valeurs absolues des caractéristiques physiques et mécaniques déterminées dépendent non seulement de la composition de l'alliage dur et des régimes technologiques dans sa fabrication, mais aussi des dimensions et des méthodes de préparation des échantillons pour les essais pertinents.

Chapitre IV

*Procédés d'optimisation
des matériaux d'outils de
coupe.*

IV.1 Introduction

Il est évident que les outils d'usinage subissent des dégradations de leur arête coupante, causées par différents phénomènes complexes et qui se produisent dans bien des cas simultanément. Ces endommagements conduisent à des pertes économiques conséquentes en industrie mécanique (pertes de capacité de production, produits déclassés, coût de remplacement des outils).

Dans le but d'augmenter la production, des améliorations ont été apportées aux outils existants. Le changement des nuances d'aciers en première transformation [66], l'emploi d'outils en VCD et PCD [67,68], ainsi que l'utilisation de machines techniquement très performantes pour la préparation des outils ont permis d'augmenter la productivité.

Par contre, comme les outils n'ont pas subi de modification, le secteur de l'usinage connaît toujours les mêmes limitations liées à leur usure prématurée. Une solution pourrait provenir de la modification superficielle des outils par des traitements structurels et des revêtements durs. Bon nombre d'études ont été menées sur ce sujet et les constats sont plus qu'encourageants.

Nous avons réalisé une recherche bibliographique sur les revêtements durs les plus étudiés et utilisés afin d'envisager quels seraient les plus avantageux pour améliorer la durée de vie des outils de coupe.

IV.2 Propriétés des aciers à outils et leurs optimisations

L'outil de coupe est l'élément indispensable pour les procédés d'usinage, il possède des caractéristiques géométriques complexes, les matériaux qui le constituent sont de plus en plus durs, les revêtements de plus en plus évolués.

Le choix des outils est généralement déterminé par le matériau à usiner et les opérations associées, ainsi que les conditions de coupe souhaitées tout en considérant les limitations de la machine-outil.

IV.2.1 La dureté

Il faut que la dureté soit élevée si l'on veut éviter que des déformations ne se produisent en service, et si l'on veut doter l'acier d'une bonne résistance à l'enfoncement. Par ailleurs, l'acier doit souvent faire preuve d'une dureté suffisante à chaud (jusqu'à 600°C). À titre d'exemple, en figure II.3 on présente la variation de la dureté en fonction de la température de revenu pour quelques aciers à outils [69].

IV.2.2 La trempabilité

Les outils doivent avoir des propriétés homogènes ; pour les pièces massives, ils doivent présenter une bonne trempabilité. Un grand pouvoir trempant est également nécessaire si l'on veut éviter que des déformations en cours de traitement ou en cours d'utilisation n'apparaissent [69].

IV.2.3 La tenue à chaud

La tenue à chaud est essentielle dans beaucoup de cas d'outils de coupe rapide, moules, filières d'extrusion, matrice de forgeage,...etc. En plus de la dureté, la tenue à chaud doit reposer sur de bonnes propriétés mécaniques, une bonne résistance au fluage et une excellente résistance à l'oxydation.

IV.2.4. La ténacité

Les cadences de fabrication étant de plus en plus élevées, il faut que les aciers à outils résistent bien aux chocs, sans se briser ni s'écailler. La figure II.4 représente l'évolution de la ténacité de quelques aciers à outils en fonction de la température.

IV.2.5 La résistance à l'usure

Les outils (de coupe ou de mise en forme) sont en continuel frottement avec les pièces qu'ils servent à fabriquer, ainsi, ils doivent conserver leur tranchant et leur géométrie le plus longtemps possible en l'occurrence, ils doivent présenter une bonne résistance à l'usure [70].

IV.2.6 La résistance aux chocs thermiques

Plusieurs types d'outils sont soumis à des chocs thermiques sévères et nombreux, auxquels ils doivent résister sans se déformer ni se fissurer [70].

IV.3 Composition chimique

L'obtention de caractéristiques mécaniques que requièrent les aciers d'outillages nécessite l'ajout à l'acier de base d'un certain nombre d'éléments d'alliage carburigènes (chrome, tungstène, molybdène, vanadium) afin d'obtenir des carbures spéciaux aussi bien après l'élaboration et les transformations à chaud (carbures primaires) qu'après traitement thermique (carbures secondaires).

À ces éléments d'alliages constituant la base des aciers à outils peuvent également s'ajouter d'autres éléments pour améliorer telle ou telle propriété fonctionnelle [71].

IV.3.1 Le Carbone

C'est l'élément essentiel de durcissement de l'acier. Au-delà de 0,6 % de carbone, on atteint la zone des aciers à outils caractérisée par un haut niveau de dureté correspond au domaine des aciers de travail à froid et des aciers à coupe rapide. Il faut noter que l'augmentation de la teneur en carbone conduit à l'abaissement de la température du liquide et du solide réduisant ainsi les domaines de température correspondante à la transformation à chaud et au traitement thermique [71].

IV.3.2 Le Chrome

Cet élément est utilisé dans la plupart des aciers à outils, en quantité allant de 0,5 à 17 %. Cet élément alpha gène joue un rôle essentiel dans l'augmentation de la trempabilité. Bien qu'ayant un pouvoir carburigène inférieur à celui du tungstène, il forme des carbures du type $7/3 MC$ qui participent à la résistance à l'abrasion et s'opposent au grossissement du grain lors de l'austénitisation [72].

IV.3.3 Le Tungstène

Il a été l'un des éléments d'alliage les plus employés dans le domaine des aciers à outils en raison de son pouvoir carburigène très important donnant naissance à des carbures de haute dureté ce qui confère aux aciers une grande résistance à l'usure. De plus, favorise le durcissement secondaire [72].

IV.3.4 Le Molybdène

Cet élément a un comportement analogue à celui du tungstène. Cependant, sa diffusivité dans le fer est quatre fois supérieure à celle du tungstène, ce qui entraîne une moins grande sensibilité de cet élément au phénomène de ségrégation.

Les aciers au molybdène présentent, par rapport aux aciers au tungstène, un certain nombre d'avantages (meilleure ductilité et densité plus faible; mise en solution plus facile des carbures de molybdène) et d'inconvénients (plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation catastrophique pour des maintiens entre 1000 et 1100 °C, plus grande sensibilité au phénomène de surchauffe, d'où réduction de la fourchette de température de trempe) [73].

IV.3.5 Le cobalt

Le cobalt améliore les propriétés à chaud et la ténacité des oxydes formés en service.

IV.3.6 Le manganèse et le nickel Ils augmentent la trempabilité des aciers à outils. Le nickel a un effet favorable sur la résistance aux chocs mécaniques, ainsi que son influence plutôt défavorable sur la résistance au revenu.

IV.3.7 Le silicium

Il contribue à l'amélioration des propriétés élastiques, notamment pour les emplois à des températures inférieures à 300 °C, et qui améliorent la pénétration de trempe par effet de synergie notamment avec le molybdène.

IV.3.8 Le soufre

Qui peut être ajouté pour améliorer les propriétés d'aptitude à l'usinage [3]. D'autres éléments d'alliage présentent un aspect plus prospectif, comme l'azote qui est ajouté au moment de l'élaboration soit par l'intermédiaire de ferroalliages nitrurés, soit par coulée sous laitier avec mise sous pression à 4 bars pour faciliter son insertion.

Ajouté en substitution partielle au carbone, l'azote entraîne une amélioration des propriétés mécaniques à chaud et de la résistance à la corrosion d'acier à outils contenant des teneurs en chrome égale 12% au minimum. Par contre, il abaisse la résistance aux chocs, l'aptitude à l'usinage par des moyens comme l'électroérosion, ainsi que l'aptitude au soudage [73].

IV.4 Les traitements structurels et superficiels (traitements thermochimiques)

Ce type de traitements est largement utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux par diffusion dans leur masse d'éléments sur de faibles profondeurs (<100 µm).

Des atomes étrangers, formant des solutions solides le plus souvent interstitielles, distordent les réseaux cristallins et augmentent la dureté superficielle en créant des contraintes résiduelles de compression, ce qui améliore la résistance à la corrosion et à l'oxydation [74].

On distingue :

- La diffusion de métalloïdes, carbone, azote, soufre, bore par voie liquide (bains de sels) ou gazeuse et plus récemment, par bombardement ionique,
- La diffusion de métaux, aluminium et chrome notamment, qui améliore la résistance à l'oxydation à haute température.

IV.4.1 La nitruration

La nitruration a été découverte en 1923 par un technicien de la firme Krupp qui, après avoir chauffé un acier dans une atmosphère d'ammoniac, observa une dureté superficielle anormalement élevée.

C'est un traitement thermochimique de diffusion consistant à enrichir superficiellement l'acier en azote. L'azote diffuse dans l'acier et forme, avec les éléments d'alliage, des nitrures très fins qui produisent un durcissement structural. La dureté de base des aciers rapides, généralement de l'ordre de 800 à 900 HV, s'accroît alors superficiellement pour atteindre des valeurs supérieures à 1200 HV.

Les propriétés des couches nitrurées dépendent dans une large mesure de leur épaisseur et pour conserver une ténacité convenable aux outils en aciers rapides, il ne faut pas que la profondeur durcie excède 50 μm [74].

IV.4.1.1 La nitruration par implantation ionique

La nitruration par implantation ionique fait partie des principaux procédés de nitruration appliqués aux outils en aciers comme le montre la figure IV.1. Ce procédé consiste à former autour des pièces à traiter un plasma contenant des ions réactifs qui, grâce à des tensions de quelques kV à quelques centaines de kV, viennent bombarder la surface de cette pièce.

Ce bombardement se traduit par un double effet :

- Chauffage des pièces par dissipation de l'énergie cinétique des ions en énergie calorifique,
- Implantation d'ions dans l'acier, fournissant dans notre cas, l'azote nécessaire à la formation de nitrures métalliques.

En pénétrant dans le matériau, l'ion incident va perdre son énergie cinétique dans des collisions électroniques et nucléaires induisant des phénomènes de freinage. Le freinage nucléaire a pour effet de mettre en mouvement les atomes du substrat, entraînant des collisions en chaînes qui désorganisent localement la structure cristalline du solide.

La répartition finale des ions étant le résultat d'un processus aléatoire, elle est bien représentée par la courbe de Gauss, caractérisée par la position R_p de son maximum et de sa largeur à mi-hauteur $2\Delta R_p$ (voir la figure II.32). Ces deux paramètres suffisent à caractériser, en première approximation, la pénétration d'un ion dans une cible [75].

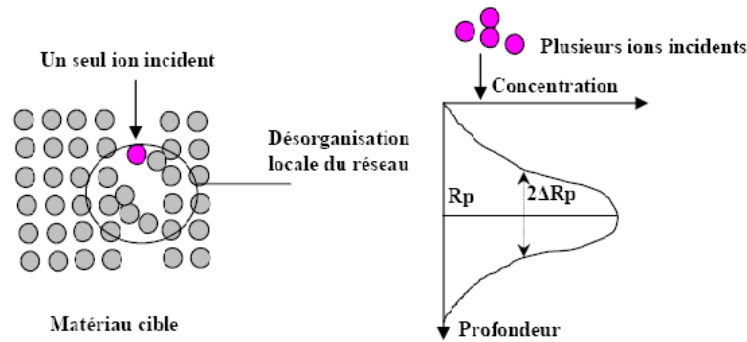


Fig. IV.1-Principe de l'implantation ionique [74].

Les avantages de la nitruration par implantation ionique résident dans la possibilité de traiter des outils de très grandes dimensions et de conserver l'état de surfaces initial des outils, même les plus fines (poli spéculaire par exemple). Par ailleurs, il est possible, par le procédé de nitruration ionique, d'éviter, en contrôlant le procédé, la formation de la couche de combinaison (ou couche blanche) très fragile en surface.

Ceci étant, l'implantation s'accompagne d'un phénomène d'érosion ou pulvérisation de la surface si l'ion incident possède une énergie supérieure à celle de l'énergie de liaison des atomes du solide.

La nitruration ionique, tout comme les revêtements durs, confère aux outils et composants traités un meilleur comportement. En augmentant la dureté superficielle, elle diminue la vitesse d'usure des surfaces traitées. Cependant, cette technique de nitruration est unidirectionnelle et se prête mal aux exigences de la production industrielle sur des surfaces complexes. La forme simple des outils utilisés n'a donc pas été un obstacle à leur traitement.

De plus, le coût de mise en œuvre d'une implantation ionique se répercute directement sur le coût des pièces produites, ce qui a limité l'application de cette technique à des industries à forte valeur ajoutée (nucléaire, microélectronique,...).

IV.4.2 Système d'Implantation ionique par immersion plasma

IV.4.2.1 Principe

Lors de l'implantation ionique, les ions sont accélérés par une grande énergie et sont projetés vers la surface de la pièce à traiter. Ce phénomène d'implantation d'ions engendre une modification de surface. Compte tenu du contrôle de la dose reçue par la pièce et de celui de l'épaisseur finale de la couche modifiée, l'implantation ionique est très utilisée pour le dopage de semi-conducteur.

Récemment, cette technique a été utilisée pour modifier les propriétés de surface de certains matériaux, par exemple l'amélioration de la résistance à l'usure d'alliages de titane. L'implantation d'azote dans des outils en acier leur confère de bonnes propriétés vis-à-vis de l'usure. L'épaisseur de la couche modifiée peut atteindre plusieurs centaines d'Å (Ångström Unité de longueur) lorsque l'énergie des ions est voisine de 100 keV (kilolectron volt) [25].

Les avantages de l'implantation ionique sont :

- L'amélioration des propriétés de surface sans affecter les propriétés volumiques des matériaux,
- pas de problème d'interface ou d'adhérence contrairement aux dépôts,
- Contrôle du processus assez simple durant l'implantation ionique.

Cependant, l'un des inconvénients majeurs de cette technique est son caractère directionnel, il est très difficile de traiter des objets 3D par ce procédé.

Dans le procédé d'implantation ionique par immersion plasma (PIII), la pièce à traiter est directement placée au sein d'un plasma. Des impulsions fortement négativement sont ensuite appliquées à la pièce. Durant le pulse de tension, une gaine plasma se forme autour de la pièce. Les ions positifs sont accélérés et projetés perpendiculairement à l'objet à traiter. L'énergie des ions correspond à la tension appliquée.

IV.4.2.2 Avantages de la PIII

- Le procédé est non-directionnel, les ions positifs frappent la surface simultanément sur toutes les faces. Ceci permet aussi de traiter facilement des pièces à géométrie complexe. La taille des pièces ne détermine pas le temps de traitement,
- Les pulses très courts ne permettent pas à la pièce de chauffer; ceci permet donc d'avoir une température de traitement peu élevée comparativement aux autres procédés de nitruration. Ce procédé est donc intéressant pour les matériaux thermosensibles,
- L'implantation ionique ne permet pas de créer des couches très épaisses, elles sont au maximum de l'ordre de 100 nm. Il est cependant assez simple de coupler le procédé PIII avec un procédé de dépôt classique tel que le CVD ou le PVD [75].

IV.4.2.3 Inconvénients de la PIII

- Lors de l'implantation, aucune séparation de masse ne peut être effectuée; tous les ions positifs présents dans le plasma sont implantés. Il est néanmoins nécessaire que ces ions possèdent une énergie suffisante.
- En théorie, plus les pulses sont importants (très haute tension négative), meilleure sera l'implantation; en réalité, les tensions de travail sont limitées et il est ainsi très difficile d'implanter certains ions. Les tensions limites sont voisines de 100 kV. En effet pour ces tensions élevées, le matériel serait trop coûteux et les risques d'amorçage d'arcs trop importants [25].

IV.5 Les revêtements industriels

La métallurgie des plaquettes repose sur deux composantes : le substrat et le revêtement représentés sur la figure IV.2. Le substrat supporte les efforts mécaniques et les contraintes thermiques de l'usinage. Le revêtement améliore la résistance à l'usure, l'inertie chimique et thermique, ainsi que le glissement du copeau sur la plaquette.

Les revêtements sont depuis 1960 un domaine important de recherche. Améliorant les conditions de coupe et la productivité, l'emploi des revêtements s'est généralisé. Aujourd'hui la plupart des nuances de carbure sont revêtues.

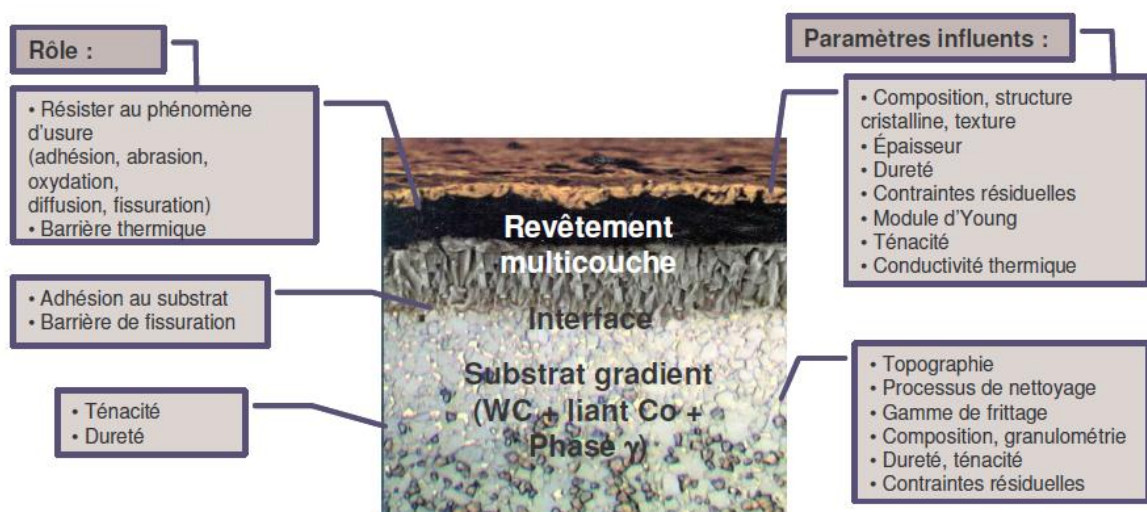


Fig. IV.2-Rôle des revêtements [25].

Le principe consiste à recouvrir le substrat d'un film mince. L'épaisseur totale du revêtement est généralement comprise entre 3 et 15 μm . Les méthodes de dépôt sont de type CVD (dépôt

chimique en phase vapeur à température médium, 800 – 1000°C) ou de type PVD (dépôt physique en phase vapeur, 400 – 600°C).

La qualité d'adhérence au substrat est un critère essentiel pour le choix du revêtement. Les matériaux déposés sont également sélectionnés par leurs propriétés à haute température (dureté, ténacité, conductivité thermique). La figure IV.2 illustre le rôle d'un revêtement.

Pour l'essentiel il doit protéger le substrat de l'usure (adhérence, abrasion, oxydation, diffusion entre copeau et matière usinée), protéger thermiquement et résister à la fissuration [Pag'03]. Les matériaux les plus fréquents rencontrés sont :

- Carbure de titane TiC
- Nitrure de titane TiN
- L'alumine Al_2O_3
- Et leurs associations TiCN (carbonitrure de titane), AlTiN, ...

Différents travaux montrent que les outils carbures revêtus en TiCN ont les propriétés requises pour l'usinage des matières qui ont une dureté inférieure à 42 HRC, alors que les outils revêtus à base d'alumine s'utilisent pour des duretés supérieures à 42 HRC [Alt'98]. Les propriétés des principaux matériaux sont indiquées dans le tableau IV.1. Les outils de coupe et les revêtements peuvent être classés en fonction de la matière à usiner, ainsi :

- Les outils carbures revêtus TiN et TiCN pour l'usinage des aciers < 42 HRC
- Les outils carbures revêtus Al_2O_3 et AlTiN pour l'usinage des aciers > 42 HRC
- Les outils CBN (nitrure de bore cubique) et SiN (nitrure de silicium) pour l'usinage des fontes,
- Les outils PCBN (avec des préparations d'arête appropriée) pour l'usinage des matériaux dur (HRC 60 - 65).

Tableau IV.1 Propriétés des différents outils de coupe et revêtement [Alt'98].

	Outils de coupes					Revêtements		
	PCD	CBN	WC	SiN	Al_2O_3	TiN	TiCN	TiAlN
Dureté (Hv)	6000	3500	1500-1800	1700	1600	2900	3000	3300
Coefficient de frottement (contacte acier à sec)	-	0.24	0.6	-	-	0.4	0.4	0.3-0.5
Température de travaille max (°C)	600	-	-	-	-	600	400	815
Conductivité thermique (W/m°K)	500	100	40-80	15-35	14-17	-	-	-
Limite de rupture (MPa)	690-960	690	1700-2000	480-750	275-345	-	-	-

Actuellement, les revêtements les plus utilisés sont les carbures de titane (TiC), les nitrures de titane (TiN), les carbonitrures de titane (TiCN) ou l'alumine (Al₂O₃). Les principales propriétés de ces revêtements sont présentées sous forme comparative dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 Comparatif des propriétés de certains revêtements [42].

Revêtements	Résistance à l'usure	Résistance chimique	Résistance thermique	Résistance au frottement
TiC	Excellent	Petite	Petite	Bon
TiN	Bon	Bon	Bon	Excellent
Ti(C, N)	Moyen	Moyen	Moyen	Très bon
Al ₂ O ₃	Très bon	Excellent	Excellent	Moyen

Le dépôt peut être monocouche ou multicouche. Le multicouche combine les propriétés de chaque dépôt et offre une meilleure résistance aux différents phénomènes d'usure. Par exemple, l'emploi de l'alumine Al₂O₃ dans les revêtements multicouches assurera la fonction d'isolant thermique comme le montre la figure IV. 3.

Le carbure de titane et l'oxyde d'aluminium, matériaux très durs, offrent une bonne résistance à l'usure. Chimiquement inertes, ils jouent le rôle de barrière chimique et thermique entre l'outil et le copeau. Le nitrure de titane n'a pas la même dureté, mais abaisse le coefficient de frottement sur les faces de la plaquette tout en améliorant la résistance à l'usure en cratère.

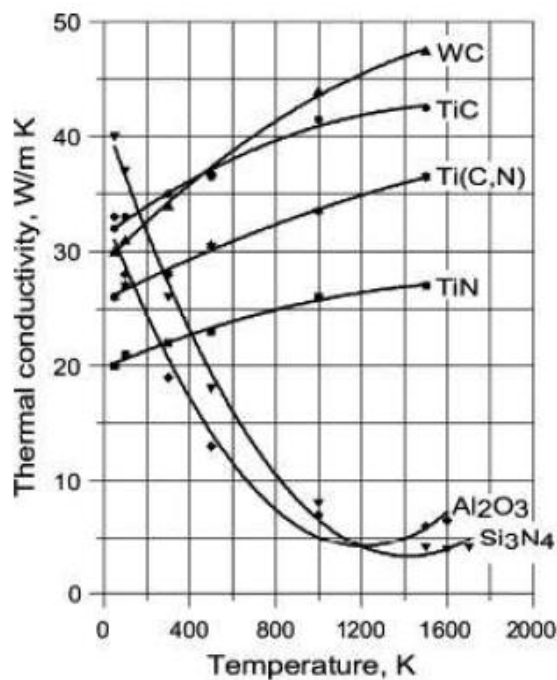


Fig. IV. 3—Évolution de la conductivité thermique en fonction de la température des constituants des outils et des revêtements [Shaw'05].

IV.5.1 Les revêtements durs en couches minces

Depuis les années 80, de nouvelles techniques de dépôt ionique se sont développées permettant de déposer des couches dures de 2000 à 4000 HV. Ces revêtements d'une épaisseur de l'ordre de 5 μm permettent à l'outil d'usiner des matériaux plus durs dans des conditions plus extrêmes [76].

Aujourd'hui les méthodes se sont développées et il existe trois procédés majeurs de dépôt, le procédé CVD (Chemical Vapor Deposition), le procédé PVD (Physical Vapor Deposition) et le procédé combinant les deux premiers le MTVD (Medium Temperature Vapor Deposition). La dureté et l'épaisseur des principaux dépôts sont fournies dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 Caractéristiques des différents revêtements pour outils disponibles [76].

Dépôts	Dureté HV	Épaisseur (μm)
Procédé CVD		
<i>TiN</i>	2000 à 5000	3
<i>TiC</i>	3000 à 3500	2 à 3
<i>Ti(C, N)</i>	2500 à 3100	3
<i>Al₂O₃</i>	2500 à 3100	3
<i>CBN</i>	3000 à 4000	3
<i>Diamant</i>	7000 à 10000	5 à 10
Procédé PVD		
<i>TiN</i>	2000 à 2500	3 à 5
<i>Ti(C, N)</i>	3000 à 3400	3 à 5
<i>(Ti, Al)N</i>	2000 à 2400	3 à 5
<i>CrC</i>	1850	3
<i>CrN</i>	1750 à 2900	3

Durant les dernières décennies, les revêtements durs en couches minces ($< 10\mu\text{m}$) déposés par méthodes CVD (dépôt chimique en phase vapeur) puis un peu plus tard par méthodes PVD (dépôt physique en phase vapeur) n'ont cessé d'être introduits dans de nombreux secteurs industriels tels que l'outillage pour l'usinage des matériaux métalliques et plastiques et dans d'autres secteurs métallurgiques tel que le moulage, le matriçage, l'estampage et le poinçonnage afin de palier aux problèmes d'usure et de dégradation de surface des composants métalliques sollicités.

Si on prend l'exemple de l'UGV (Usinage Grande Vitesse), l'augmentation de la vitesse de coupe génère une augmentation de la chaleur dissipée vers l'outil ce qui peut provoquer soit la dissolution du matériau de l'outil soit une usure chimique et par conséquent la rupture de l'outil. L'augmentation de la vitesse d'avance provoque d'importantes contraintes mécaniques qui causent au niveau de l'outil une déformation plastique avec pour conséquence l'apparition d'ébréchures et donc l'endommagement de l'arête de coupe [76].

Par ailleurs, la faible conductivité thermique des revêtements durs génère une barrière thermique sur la surface de l'outil diminuant le transfert de chaleur au cœur de l'outil et favorisant sa dissipation et son évacuation à la surface de coupe avec le copeau produit [76].

Les composants métalliques travaillant en usure peuvent être sujets à des dégradations intensives lors du traitement de matériaux métalliques, composites ou plastiques qui libèrent du S, F ou Cl lors de l'opération de formage. Cet endommagement est attribué à de l'usure combinée, corrosive et abrasive. Il réduit considérablement la durée de vie de ces composants et a une incidence directe sur la productivité et la qualité du produit. L'application de revêtements durs en couches minces a prouvé son efficacité contre ces phénomènes [77].

En général, les revêtements durs se subdivisent en deux groupes : les revêtements possédant une dureté < 40 GPa et les revêtements super durs avec des duretés > 40 GPa. Comparés à un grand nombre de revêtements, ils ne sont que quelques-uns à présenter ces propriétés de « super dureté » : le nitrure de bore cubique (c-BN), le carbone amorphe (DLC), le nitrure de carbone amorphe (a-CN_x) et le diamant polycristallin (PCD).

Cependant ces revêtements super durs sont instables thermodynamiquement et connaissent une limitation d'utilisation dans plusieurs applications. Pour l'instant, du fait de la haute affinité que possède le carbone pour le fer, l'application des outils de coupe revêtus diamant est limitée à l'usinage de l'aluminium et de ses alliages.

L'application des revêtements c-BN trouve des problèmes similaires lors de l'usinage des aciers dus à la dissolution chimique du bore dans le fer [24]. Aussi, ces propriétés de dureté sont en étroite relation avec les conditions d'élaborations. Les méthodes de dépôts en font partie, d'où l'intérêt de les décrire [77].

IV.5.2 Méthodes de dépôts

À la fin des années 60, les premiers revêtements CVD étaient appliqués aux outils de coupe de l'industrie du métal. Ces revêtements étaient tous à base de titane [19], mais étant donné que l'élaboration de ces revêtements nécessite l'utilisation de hautes températures (900-1000°C) [19,24], il s'est avéré que les techniques de dépôt PVD ne travaillant qu'à des températures $< 400^\circ\text{C}$ ont été préférés, en particulier pour l'application de revêtements réfractaires sur aciers.

Employant de faibles températures lors du dépôt, les PVD permettent d'éviter la dégradation des propriétés mécaniques de surface et minimisent les problèmes dus à des contraintes thermiques d'expansion entre le substrat et le dépôt [78].

Les premiers revêtements PVD ont été introduits au milieu des années quatre-vingt. Depuis, des progrès ont été amenés à ces méthodes et ont permis l'obtention de nouveaux revêtements avec des propriétés spécifiques jusque-là jamais atteintes par les méthodes CVD conventionnelles [19].

Il a ainsi été prouvé depuis de nombreuses années que l'application de revêtements durs en couche mince par différentes méthodes de dépôts PVD sur les outils d'usinage améliore nettement les performances de ceux-ci [79].

Les avantages des couches minces élaborées par ces méthodes allient une haute résistance à l'usure, une bonne ténacité, une bonne stabilité chimique et thermique ainsi qu'un faible coefficient de frottement [79].

IV.5.3 Les revêtements durs à deux composés « binaires »

Les nitrures des métaux (tels que TiN, CrN, HfN, ZrN, NbN,...) forment une gamme très étendue de matériaux possédant des propriétés physiques intéressantes, grâce auxquelles ils sont très utilisés dans de nombreuses applications industrielles. Ces revêtements durs présentent une haute dureté mécanique combinée à une bonne stabilité thermique et chimique.

L'optimisation de ces revêtements est aisée. En effet, on peut ajuster des propriétés comme le paramètre de la dureté, l'élasticité, le coefficient d'expansion thermique ou le comportement en corrosion pour les optimiser. TiN (nitrure de titane) et CrN (nitrure de chrome) font partie des revêtements les plus employés [80].

Le nitrure de titane TiN est le plus ancien des revêtements PVD. Il a fait l'objet de nombreuses études depuis le début des années 80. Ses propriétés particulières ont conduit à son application aussi bien comme couche anti-usure sur les outils de coupe que comme substitut de l'or dans la joaillerie.

Il a été utilisé aussi dans la technologie des circuits intégrés comme barrière de diffusion. En raison de son efficacité dans différentes applications industrielles, TiN reste à ce jour le revêtement le plus utilisé. Il représente 90 % du marché des revêtements [80].

Lors d'une étude comparative menée par Rodríguez *et al.* il s'avère que le TiN déposé par méthode PVD (évaporation par arc) possède la valeur de dureté la plus élevée comparée au CrN et ZrN déposés par la même méthode.

De par sa haute dureté, TiN est un bon candidat à l'augmentation de la résistance à l'usure des outils de coupe, et des composants sollicités en usure. Cet un revêtement également très performant dans les milieux corrosifs.

En contrepartie, l'utilisation du nitrure de chrome CrN est très répandue dans de nombreuses applications industrielles où il est nécessaire d'avoir un revêtement qui possède une bonne protection contre l'usure adhésive et corrosive.

Généralement ce matériau est employé pour revêtir les moules pour l'injection des plastiques et les matrices pour le formage des métaux. De récentes études indiquent que le CrN possède une haute résistance à l'oxydation, un faible coefficient de frottement et une haute ténacité [81]. Bien que ce revêtement présente une dureté inférieure à la majorité des revêtements durs.

Ont montré que le CrN comparé à TiCN, TiN, ZrN ou AlTiN possède la vitesse d'usure la plus faible. Par ailleurs, ces dernières années CrN attire de plus en plus l'attention des chercheurs pour son application contre l'usure et la corrosion des outils de coupe. On trouve aujourd'hui sur le marché des outils revêtus en CrN [81].

Quand à TiC, il montre des propriétés similaires au TiN. Le BN a prouvé sa capacité à augmenter la durée de vie de certains composants exposés à des environnements corrosifs et érosifs utilisés en industrie des polymères [81].

Le nitrure d'aluminium AlN a été développé vers la fin des années 1960. Il a été obtenu par méthode CVD. Ce revêtement possède une bonne stabilité thermique et chimique, une grande résistivité électrique. Les couches minces d'AlN sont des candidats pour des applications plus larges, comme la passivation des circuits électroniques ou la résistance à la corrosion [82].

Un autre dépôt dur, ZrN est utilisé comme revêtement pour la coupe des matériaux non ferreux tels que les alliages d'aluminium et nickel. Enfin, le nitrure de bore cubique c-BN, est un revêtement super dur.

Une récente étude menée par Keuncke *et al.* Montre que la valeur de dureté de ce revêtement mesurée par nanoindentation est de 65 GPa et que la vitesse d'usure abrasive est clairement inférieure à la vitesse d'usure du TiN.

IV.5.4 Les revêtements durs à plusieurs composés

Sur la base des composés binaires tels que TiN et TiC, plusieurs stratégies ont été adoptées pour améliorer et adapter les revêtements durs à des problèmes tribologiques spécifiques. Une des approches adoptées est la synthèse de revêtements multicomposés en ajoutant des éléments métalliques ou non aux composés binaires [83].

Ainsi l'augmentation du nombre de composants dans le revêtement permet l'obtention d'une microstructure plus fine, une taille de grains plus faible conduisant à une plus grande résilience et élasticité, mais aussi à l'absence d'une interface discrète, à de faibles contraintes internes et à une grande résistance à la corrosion [83].

Les premiers revêtements multicomposés qui ont montré de bonnes propriétés sont TiCN et TiAlN généralement utilisés en UGV [54-56]. TiCN est surtout approprié pour réduire l'usure abrasive des arêtes de coupe des outils. TiAlN présente une dureté supérieure à celle de TiN et ceci améliore considérablement la résistance à l'usure abrasive.

Sa résistance à l'oxydation est aussi supérieure grâce au fait qu'à haute température, TiN s'oxyde (formation de TiO_2 qui fragilise le revêtement) alors que dans la matrice de TiAlN se forme de l'alumine Al_2O_3 qui joue le rôle de barrière thermique et de diffusion [83].

Ce revêtement possède une température d'oxydation supérieure (200 °C de plus que TiN et CrN). Dans le processus de perçage, les forets revêtus TiAlN permettent d'améliorer la durée de vie de 3 à 4 fois plus que les forets revêtus TiN. Ces avantages sont dus aux excellentes propriétés thermophysiques, tribologiques et mécaniques que possède ce revêtement. En raison de ces faits, des outils revêtus peuvent être utilisés pour différentes opérations telles que l'UGV comme cité précédemment ou l'usinage avec ou sans lubrification [84].

Il a également été montré que l'addition d'une faible quantité de Cr et Y procure une amélioration de la résistance à l'usure spécialement à haute température de TiAlN [9]. En effet, Yamamoto *et al.* ont observé que la température d'oxydation de (Ti,Cr,Al)N est de 1000°C tandis que la température d'oxydation du TiAlN est de 850°C.

Une comparaison des deux revêtements sur outils carbures a été effectuée en fraisage grande vitesse d'acier moulé (AISI H13) et il en a résulté que le (Ti,Cr,Al)N permet une usure plus faible de l'outil après 70 m d'usinage comparé au TiAlN après 50 m (seuil de fin de vie de l'outil). De plus, la résistance à l'oxydation de CrTiN est meilleure que celle des monocouches TiN et CrN [84].

Les revêtements CVD de dernière génération incluse le carbonitruent de titane (MT-Ti(C,N) et MT-TiCN, aussi appelés revêtements MT-CVD). Ils ont été développés pour améliorer les propriétés des nuances, notamment grâce à leur capacité à protéger l'interface avec le substrat carbure cimenté.

Les principaux composants des revêtements PVD sont décrits ci-dessous [85].

PVD-TiN - Le nitrure de titane a été le premier revêtement PVD utilisé. Il possède des propriétés polyvalentes. Il est de couleur jaune,

PVD-Ti(C,N) - Le carbonitruent de titane est plus dur que le nitrure de titane. Il apporte une meilleure résistance à l'usure en dépouille,

PVD-(Ti,Al)N - Le nitrure de titane aluminium a une grande dureté qui se combine à une résistance à l'oxydation. La résistance générale à l'usure est meilleure,

PVD-oxyde utilisé pour sa neutralité chimique et sa meilleure résistance à l'usure en cratère.

IV.5.5 Traitement cryogénique de surface

Récemment, un nouveau type de traitement de surface, dit traitement cryogénique, semble améliorer la résistance à l'usure de plaquettes carbures et diminuer les efforts de coupe [86]. La mesure des efforts et les observations réalisées sur les arêtes de coupe montrent que ce traitement réalisé à -33°C réduit considérablement l'usure des outils traités.

Ceci fut expliqué par le fait qu'il agit sur le liant cobalt et conduit au maintien des grains de carbures durant l'usinage.

IV.6 Identifier et traiter les huit types d'usures de plaquettes les plus courantes

IV.6.1 Introduction

L'usure des plaquettes et leur impact négatif sur les équipements de fabrication sont considérables. Il est évident que les outils d'usinage subissent des dégradations de leur arête coupante, causées par différents phénomènes complexes et qui se produisent dans bien des cas simultanément. Ces endommagements conduisent à des pertes économiques conséquentes en industrie mécanique (pertes de capacité de production, produits déclassés, coût de remplacement des outils).

La plaquette subit sans cesse un effort important, provoquant son usure. Si elle n'est pas traitée, l'usure peut être une source de surcoût pour la production et générer des effets indésirables ou une faible productivité pour un fabricant [87].

Toutefois, il est possible d'analyser la plaquette utilisée pour atteindre la durée de vie maximale et prévoir son usure, tout en conservant les précisions des pièces et en réduisant le temps de dégradation. Un examen précoce de la plaquette est essentiel pour déterminer la cause d'usure. La non-consideration de ces mesures importantes peut entraîner une confusion entre les différents types de modes d'usure.

IV.6.2 Les huit types d'usures de plaquettes les plus courantes

Pour faciliter le processus d'examen de la plaquette, généralement on utilise un stéréoscope, avec une bonne optique, un bon éclairage et un grossissement d'au moins 20X, peut donner d'excellents résultats dans l'identification de ces huit modes d'usure les plus courants qui contribuent à une usure prématurée de la plaquette.

IV.6.2.1 Usure en dépouille

L'usure de la plaquette est liée à l'usure normale de tout type de matériau. L'usure en dépouille normale est le mécanisme d'usure le plus souhaitable, car elle représente la forme la plus prévisible. Elle se produit de manière uniforme et progressive, car la matière première use l'arête de coupe, comme l'usure d'une lame de couteau.

L'usure en dépouille normale commence lorsque des inclusions microscopiques dures ou du matériau écroui dans la pièce à usiner usent la plaquette voir la figure IV.4. Les raisons de cette usure sont notamment l'abrasion à faibles vitesses de coupe et les réactions chimiques à des vitesses de coupe élevées.

L'identification de l'usure en dépouille normale se traduit par une marque d'usure relativement uniforme le long de l'arête de coupe de la plaquette. De temps à autre, le métal de la pièce à usiner s'étale sur l'arête de coupe et exagère la taille apparente de la marque d'usure sur la plaquette.

Pour ralentir l'usure en dépouille normale, il est important d'employer la nuance de plaquette la plus résistante, qui ne s'écaille pas, et l'arête de coupe la plus douce pour réduire les efforts de coupe et les frictions.

L'usure en dépouille rapide, en revanche, n'est pas souhaitable, car elle réduit la durée de vie de l'outil et les 15 minutes de temps de coupe généralement souhaités ne seront pas atteints. L'usure rapide se produit souvent lors de la coupe de matériaux abrasifs tels que les fontes ductiles, les alliages de silicium-aluminium, les alliages à haute température, les aciers inoxydables PH traités thermiquement, l'alliage de cuivre au béryllium et les alliages de carbure de tungstène, ainsi que des matériaux non métalliques tels que des fibres de verre, l'époxyde, les matières plastiques renforcées et la céramique.

Les signes de l'usure en dépouille rapide ont le même aspect que l'usure normale. Pour corriger l'usure en dépouille rapide, il est essentiel de sélectionner une nuance de plaquette plus résistante à l'usure, plus dure ou revêtue de carbure, ou encore de s'assurer que le fluide de refroidissement est correctement appliqué. La réduction de la coupe est également très efficace, mais est contre-productive, car elle affecte négativement les temps de cycle [88].



FIG. IV.4-L'usure en dépouille normale [89].

IV.6.2.2 Formation de cratères

Survenant souvent au cours de l'usinage à grande vitesse d'alliages à base de fer ou titane, la formation de cratères est un problème de chaleur/chimique lié essentiellement à l'usure de la plaquette dans la zone où les copeaux de la pièce à usiner se forme.

La combinaison d'usure de diffusion et d'abrasion provoque la formation de cratères. En présence de fer ou de titane, la chaleur dans le copeau de la pièce provoque une usure due à la diffusion de chaleur. , créant ainsi un « cratère » sur le haut de la plaquette. Il finira par devenir

suffisamment conséquent pour que la face de du copeau de la plaquette s'écaille, se déforme ou éventuellement entraîne une usure de dépouille rapide.

IV.6.2.3 Formation d'arêtes rapportées

Les arêtes rapportées se produisent lorsque des fragments de la pièce à usiner sont soudés par pression à l'arête de coupe voir la figure IV.5, en raison d'une affinité chimique, à haute pression et à une température suffisante dans la zone de coupe. L'arête rapportée est susceptible de se détacher et d'emporter des morceaux de plaquette avec elle, provoquant l'écaillage et l'usure en dépouille rapide.

Ce mécanisme de rupture se produit généralement avec des matériaux collants, à faibles vitesses, avec des alliages haute température, des aciers inoxydables et des matériaux non ferreux et pendant des opérations de filetage et de perçage. Une arête rapportée est identifiable grâce à des changements irréguliers dans la taille ou la finition d'une pièce, ainsi que par l'apparition de matériaux brillants sur le dessus ou sur la face de dépouille de l'arête de la plaquette [90].

Les arêtes rapportées peuvent être contrôlées en augmentant les vitesses de coupe et les avances, en utilisant des plaquettes revêtues de nitrure (TiN), en appliquant du fluide de refroidissement correctement (en augmentant la concentration, par exemple), et en sélectionnant des plaquettes avec présentant des géométries à coupe douce et/ou des surfaces plus lisses.



FIG. IV.5-Arête rapportée [89].

IV.6.2.4 Écaillage

L'écaillage provient de l'instabilité mécanique souvent créée par des configurations non rigides, la figure IV.6 présente clairement ce phénomène, des roulements défailants ou des broches usées, des zones dures dans les matières premières ou une coupe interrompue. Cela se produit parfois à des moments inattendus comme pendant l'usinage des matériaux constitués de poudre où la porosité est délibérément laissée dans les pièces.

Les inclusions dures dans la surface du matériau coupé et les coupes interrompues entraînent des concentrations d'efforts localisés et peuvent provoquer l'écaillage de la plaquette.

Dans ce type de mode d'usure, les copeaux situés le long de l'arête de coupe sont très visibles. La formation de l'écaillage peut être évitée en assurant une configuration adéquate de la machine-outil, en réduisant au maximum la flexion et vibration, en utilisant des plaquettes rectifiées, en contrôlant la formation des arêtes rapportées, et en employant des nuances de plaquettes plus dures et/ou des géométries d'arête de coupe plus robustes [91].



FIG. IV.6-Écaillage d'une plaquette [89].

IV.6.2.5 Défaillance mécanique thermique

Une combinaison de fluctuations de températures rapides et des chocs mécaniques peuvent provoquer une usure mécanique thermique voir la figure IV.7. Des fissures se forment le long de l'arête de coupe, ce qui entraîne l'arrachage des particules d'usure de carbure de la plaquette et la formation de l'écaillage.

L'usure mécanique thermique survient surtout lors du fraisage et parfois lors du tournage à coupe interrompue, pendant les opérations de surfacage de grandes séries, et celles avec un flux de fluide de refroidissement intermittent. Les signes d'usure mécanique thermique se vérifient par la présence de plusieurs fissures perpendiculaires à l'arête de coupe.

Il est important d'identifier ce mode d'usure avant le début de l'écaillage. Il est possible d'éviter cette usure mécanique thermique en utilisant correctement le fluide de refroidissement ou, mieux encore, à sec, en utilisant une nuance plus résistante aux chocs, à l'aide d'une géométrie de réduction de chaleur et en diminuant la vitesse d'avance.



FIG. IV.7-Usure mécanique thermique [89].

IV.6.2.6 Déformation de l'arête

Une chaleur excessive associée à un chargement mécanique est une source de déformation de l'arête qui représenté sur la figure IV.8. Une chaleur élevée est souvent rencontrée à des vitesses et des avances élevées ou dans l'usinage des aciers durs, des surfaces de travail écrouies et des alliages haute température. Une chaleur excessive provoque la malléabilité du liant de carbure ou du cobalt dans la plaquette.

Un chargement mécanique se produit lorsque la pression de la plaquette contre la pièce à usiner déforme la plaquette ou provoque l'affaissement de sa pointe, conduisant à sa rupture ou à la formation d'usure en dépouille rapide.



FIG. IV.8-Déformation de l'arête tranchante [89].

IV.6.2.7 Formation d'entailles

Les entailles se produisent quand la surface de pièce à usiner est abrasive dans la zone de coupe . Les surfaces forgées, oxydées, écrouies ou irrégulières peuvent provoquer la formation d'entailles comme le montre la figure IV.9. Alors que l'abrasion est la cause la plus commune, l'écaillage peut également se produire dans cette zone. La profondeur de passe sur une plaquette correspond souvent à un effort de résistance, ce qui la rend fragile aux chocs [89].

Ce mode d'usure devient visible lorsque des entailles et l'écaillage commencent à apparaître dans la zone de profondeur de passe. Pour empêcher la formation d'entailles, il est important de varier la profondeur de passe , d'utiliser un outil avec un angle d'attaque plus grand, d'augmenter les vitesses de coupe lors de l'usinage des alliages haute température, de réduire les vitesses d'avance et d'empêcher l'accumulation, en particulier dans l'acier inoxydable et les alliages haute température.



FIG. IV.9-Formation d'entailles d'une plaquette [89].

IV.6.2.8 Rupture mécanique

La rupture mécanique d'une plaquette (voir la figure IV.10) se produit lorsque l'effort de coupe imposée est supérieur à la résistance de la plaquette. Tous les modes d'usure décrits dans cet article peuvent contribuer à la rupture. Il est possible d'éviter la rupture mécanique en corrigeant l'ensemble des autres modes d'usure en plus de l'usure en dépouille normale.

L'utilisation d'une nuance plus résistante aux chocs, la sélection d'une géométrie de plaquette plus robuste, à l'aide d'une plaquette plus épaisse, la réduction des vitesses d'avance et/ou de la profondeur de coupe, la vérification de la rigidité d'une entrée difficile sont toutes des actions correctives efficaces. Grâce à la connaissance de ces huit modes d'usure, vous pouvez augmenter la durée de vie de vos outils [89].

Les avantages se caractérisent par : une augmentation de la productivité, l'amélioration et la cohérence de durée de vie de l'outil, une meilleure tolérance et apparence de la pièce, une baisse de l'usure et une diminution du risque des effets catastrophique pouvant stopper la production et endommager vos pièces.



FIG. IV.10-Rupture mécanique d'une plaquette [89].

IV.7 Conclusion

À ce jour, les résultats des expérimentations réalisées en laboratoire avec les outils modifiés en surfaces sont loin d'être concordants. Dans certaines études, des améliorations des performances des outils sont notées tandis que dans d'autres c'est le comportement des outils conventionnels qui l'emporte. Ces performances médiocres causées par la délamination des revêtements sont souvent attribuées aux faibles angles de bec des plaquettes utilisées et aux vitesses de coupe très importantes.

On note également qu'il y a eu très peu d'études réalisées sur des machines industrielles où le comportement des outils à des sollicitations plus importantes sera différent.

Les revêtements CVD modernes combinent plusieurs couches MT-Ti(C,N), Al₂O₃ et TiN. Les propriétés des revêtements ont fait l'objet de recherches pour améliorer leur adhérence, leur ténacité et leur résistance à l'usure au moyen d'optimisations du micro structure et de post traitements.

Pour optimiser l'utilisation des plaquettes et de réduire leurs l'usure il faut contrôler les conditions de coupe, la géométrie de la conception des plaquettes, les nuances des matériaux utilisés, ainsi de revoir l'arrosage conformément les nuances.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail développe la méthode originale de choix d'un matériau des outils et des conditions de coupe en vue de l'usinage pour d'obtenir des durées de vie d'outils supérieures et pour l'évolution du parc machines et d'augmenter les vitesses de travail. et Les corps d'outils deviennent plus précis, et le choix des matériaux et des traitements est fait en fonction des opérations envisagées.

Alors que Le rendement économique des machines-outils dépend essentiellement des performances des outils de coupe. En plus des conditions d'utilisation de l'outil, celles-ci sont fonction des propriétés du matériau.

À ce jour, les résultats des expérimentations réalisées en laboratoire avec les outils modifiés en surfaces sont loin d'être concordants. Dans certaines études, des améliorations des performances des outils sont notées tandis que dans d'autres c'est le comportement des outils conventionnels qui l'emporte. Ces performances médiocres causées par la délamination des revêtements sont souvent attribuées aux faibles angles de bec des plaquettes utilisées et aux vitesses de coupe très importantes.

On note également qu'il y a eu très peu d'études réalisées sur des machines industrielles où le comportement des outils à des sollicitations plus importantes sera différent.

Les revêtements CVD modernes combinent plusieurs couches MT-Ti(C,N), Al₂O₃ et TiN. Les propriétés des revêtements ont fait l'objet de recherches pour améliorer leur adhérence, leur ténacité et leur résistance à l'usure au moyen d'optimisations du micro structure et de post traitements.

Pour optimiser l'utilisation des plaquettes et de réduire leurs l'usure il faut contrôler les conditions de coupe, la géométrie de la conception des plaquettes, les nuances des matériaux utilisés, ainsi de revoir l'arrosage conformément les nuances.

Bibliographie

- [1] **Cordebois, J. P., & Colombié, M. (2013)**. Fabrication par usinage-2ème édition-NP. Dunod.
- [2] **Dugas, A. (2002)**. CFAO et UGV: Simulation d'usinage de formes complexes (Doctoral dissertation, Nantes).
- [3] **Puigsegur, L. (2002)**. Caractérisation thermique d'un procédé d'usinage par tournage: approche analytique et par identification de systèmes non entiers (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).
- [4] **Nouari, M., Calamaz, M., & Girot, F. (2008)**. Mécanismes d'usure des outils coupants en usinage à sec de l'alliage de titane aéronautique Ti-6Al-4V. *Comptes Rendus Mécanique*, 336(10), 772-781.
- [5] **BAGUR François**, Matériaux pour outils de coupe, Techniques de l'ingénieur Outillage et machine-outil pour le travail des matériaux, base documentaire, TIB511DUO, 1999.
- [6] **[San'97] Sandvik, A. and Coromant**. Techniques modernes d'usinage - Guide Pratique, Sandvik, ISBN 91-97 22 99 - 2, (1997).
- [7] **[Vel'07] Velasquez, J. D. P.** Etude des copeaux et de l'intégrité de surface en usinage à grande vitesse de l'alliage de titane TA6V. *Sciences des matériaux - Physique*. France, Université Paul Verlaine de Metz, (2007), p .
- [8] **[Mey'79] Meyer R.**, Evolution des outils de coupe: Aciers rapides et métaux durs. *Matériaux & Techniques*, deuxième partie, juin 1979
- [9] **Nguyen, T. T. (2010)**. Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre (Doctoral dissertation, Université de Bretagne Sud).
- [10] **Chataud, J., Desreumeux, S., & Cartwright, T. (1988)**. Procédé de fabrication d'un hydrolysate enzymatique de protéines riche en di- et tri-peptides, utilisable notamment en nutrition artificielle et en diététique. Laboratório Roger Bellon, Neuilly-sur-Seine-FR. A23J3/00. FR87402837, 6(0.274946), A1.
- [11] **Laheurte, R. (2004)**. Application de la théorie du second gradient à la coupe des matériaux (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).
- [12] **Guegan, P., Lemaitre, F., & Hamann, J. (1992, December)**. Contribution a l'usinage des matériaux composites. In *La Construction Navale en Composites*, Paris (France), 7-9 Dec 1992.
- [13] **Robert .L .** Matériaux pour outils de coupe. *Matériaux série-métalliques*.
- [14] **Habak, M. (2006)**. Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier à roulement 100Cr6 (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).
- [15] **Necib, D., & Bouchoucha, A.** Contribution à l'optimisation de la durée de vie d'un outil de coupe par l'application d'un champ magnétique.
- [16] **Bisu, C. F. (2007)**. Etude des vibrations auto-entretenues en coupe tridimensionnelle: nouvelle modélisation appliquée au tournage (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I; Université Politehnica Bucarest).
- [17] **Bidal, S. (2003)**. Reconstruction tridimensionnelle d'éléments anatomiques et génération automatique de maillage éléments finis optimisés (Doctoral dissertation, Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II).

- [18] **Ahcene, F. (2016).** Contribution à l'étude de l'entraînement électrique d'une fraiseuse universelle (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [19] **Hamza, I., Bouaziz, Z., & Haddar, M. (2005).** Optimisation du choix des outils de coupe pour l'usinage des poches quadrilatères en 2D1/2. In Proceedings of the 4th International Conference on Integrated Design and Production (p. 17).
- [20] **Bedrin, C., & Roumesy, B. (1989).** Usinage par outil coupant, fascicule 1-2. INSA Lyon, 28-40.
- [21] **Bedrin, C., & Roumesy, B. (1989).** Usinage par outil coupant.
- [22] **Mohammad, R. (2011).** Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
- [23] **Rami, M. (2011).** Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critère d'aide à la décision du changement de plaquette. Application cas de l'ébauche de turbines de pompage. Doctorat de l'université de Toulouse, Paul Sabatier, France.
- [24] **BAGUR, F. (1999).** Matériaux pour outils de coupe. Techniques de l'ingénieur. Génie mécanique, (BM7080), BM7080-1.
- [25] **Amri, B. (1989).** Contribution a l'etude du comportement des materiaux modernes pour outils coupants.
- [26] **Trent, E. M., & Smart, E. F. (1981).** Distribution de la température dans les outils de coupe des aciers. Matériaux & Techniques, 69(8-9), 291-293.
- [27] **ATHMANI, M. (2011).** Amélioration des propriétés de surface d'un acier a outils de travail à chaud par des traitements thermiques et thermo-chimiques (Cémentation) (Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar de Annaba).
- [28] **LÉVÊQUE, R. (1996).** Aciers a Outils. Ed. Techniques Ingénieur.
- [29] **Barrau, O. (2004).** Étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse).
- [30] **BOUZIANE, A., BOULANOUAR, L., AZIZI, M., & KEBLOUTI, O.** Etude de l'effet de la vitesse de coupe sur l'usure des outils de coupe en carbure métallique revêtu et non revêtu.
- [31] **Blanpain, E. (1964).** L'utilisation rationnelle des carbures métalliques en dehors des outils coupants (à suivre). La Pratique des Industries Mécaniques, 47(4), 85-92.
- [32] **Rech, J. (2002).** Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures à la fraiseuse à grande vitesse (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [33] **Yahiaoui, M. (2013).** Comportement tribologique de diamants polycristallins et de carbures cémentés WC-Co avec traitements de graduation: application aux inserts et taillants d'outils pour le forage de formations rocheuses fortement abrasives (Doctoral dissertation, École Doctorale Sciences de la Matière (Toulouse); 154236152).
- [34] <http://www.exmachina-shop.fr/SHOP/catalog/index.php?cPath=27>.
- [35] **Bonjour, C. (1980).** Nouveaux développements dans les outils de coupe en carbure fritté. Wear, 62(1), 83-122.
- [36] **Shetty, D. K., Wright, I. G., & Stropki, J. T. (1985).** Slurry erosion of WC-Co cermets and ceramics. ASLE transactions, 28(1), 123-133.

- [37] **Yallese, M., Boulanouar, L., & Belhadi, S. (2003).** Etude de l'endommagement des outils de coupe en céramique noire et en CBN lors du tournage d'un acier durci. *Revue de*, 1(5), 323-339.
- [38] **Yallese, M. A., Boulanouar, L., & Chaoui, K. (2004).** Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique. *Mechanics & Industry*, 5(4), 355-368.
- [39] **Moitzi, H. (1985).** PCD for chipboard machining. *IDR. Industrial diamond review*, 45(509), 175-181.
- [40] **K Ahaouari, F Corvasce, P Lipinski,** Détermination des propriétés thermomécaniques des composites à matrice métallique, *Mémoires et Etudes Scientifique, Revue de métallurgie*, 1990, pp 73-83.
- [41] **Labidi, C. (2006).** Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [42] **[Saf'07] Catalogue de tournage, 2007** – Documentation Valenite Safety.
- [43] **H.Pastor,** «Fabrication et propriétés d'utilisation des cermets carbure de tungstène-cobalt - prospective dans le domaine de la coupe», *Matériaux et Techniques*, pp 433-450, Décembre 1984.
- [44] **S.Roure,** «Densification des mélanges de poudres WC-Co : de la compression au frittage », Thèse de Doctorat, INPG Grenoble, Décembre 1996.
- [45] **C.H.Allibert,** Contract report, 1997.
- [46] **[Mey'79] Meyer R.,** Evolution des outils de coupe: Aciers rapides et métaux durs. *Matériaux & Techniques*, deuxième partie, juin 1979
- [47] **[Rec'05] Rech J., Schaff M-J., Hamdi H.,** Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing. *CPI, Marocco* (2005).
- [48] **[Ger'06] Germain, G.** Contribution à l'optimisation du procédé d'usinage assisté laser. *Mécanique, Matériaux et Procédés.* Angers France, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - Angers. (2006),
- [49] **[Amm'90] Ammann J.** Etude des propriétés mécaniques du matériau composite WC-Co par frottement intérieur. *Physique.* Lausanne, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (1990), p.
- [50] **[Bou'05] Boutin Y.** L'usinage a Grande Vitesse (6 de 6), section : les matériaux d'outils de coupe <http://magazinemci.com/supmetal/articles/2005/08/aout0506.htm> 16/04/2018.
- [51] **G. WEGNEZ P. HENQUET** Amélioration du procédé de fabrication des plaquettes de filetage pour le secteur pétrolier *Revue Scientifique des Ingénieurs Industriels* n°27, 2013.
- [52] **A.F. Lisovski,** *Métall. and Mater. Trans.*, 25A (1993), pp. 733.
- [53] **Y.J. Park et al.** « Abnormal grain growth in a liquid matrix », *Proc.of the 2nd Pacific Rim Inter. Conf. on Adv. Mater. and Processing*, Ed. K.S. Shin, The Korean Institute of Metals and Mater., 1995, pp. 407-412.
- [54] **B. Uhrenius.** « Phase Equilibria and the Sintering of Cemented Carbides », *Proc. Of the Powder Metallurgy World Congress – Paris 6-9 June 1994, Vol2*, pp. 1443-1450. [http://dx.doi.org/10.1016/0026-0657\(95\)91818-3](http://dx.doi.org/10.1016/0026-0657(95)91818-3)
- [55] **R. Spiegler et al.** « Fracture toughness evaluation of WC-Co alloys by indentation testing », *J. Hard Mater.*, vol.1 (3), 1990, pp.147-158.

- [56] **C.B. Ponton et al.** « Dependence of the Vickers indentation fracture toughness on the surface crack length », *Br. Ceram. Trans. J.*, Vol. 88, 1989, pp. 89-90.
- [57] **B. Roebuck.** « A model for the limiting strength of hardmetals », *J. Hard Mater.*, 6 (1995) pp. 1-15.
- [58] **J. Lamon,** « La rupture des céramiques », *La revue de Métallurgie-CIT/Science et Génie des Matériaux*, Février 1995, pp. 265-284. <http://dx.doi.org/10.1051/metal/199592020265>
- [59] **J.J. Fernandes et al.** « Effects of surface roughness on the flexural strength of a hardmetal », *J. of Mater. Sc.*, 29 (1994), pp. 2008-2012. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01154674>
- [60] **U. Schleinkofer et al.** « Fatigue of hard metals and cermets - the present knowledge and its technical importance and application », *Adv. in Powder Metall. & Part. Mater., Proc. of World Congress on Powder Metall. & Part. Mater., Washington DC, June 16-21, 1996*, pp. 1885-1896.
- [61] **E.F. Drake et al.** « Fatigue damage in a WC-Nickel cemented carbide composite », *Metall. Trans. A*, Vol. 12A, March 1981; pp. 505-513. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02648549>
- [62] **M.V. Frandsen,** « Thermal conductivity and electrical resistivity of cemented transition-metal carbides at low temperatures », *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 74 [6], 1991, pp. 1411-1416. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1991.tb04121.x>
- [63] **M.V. Frandsen,** « Thermal conductivity and electrical resistivity of cemented transition-metal carbides at high temperatures », *J. Hard Mater.*, Vol. 1 (3), 1990, pp. 159-167.
- [64] **W.J. Tomlinson et al.** « Corrosion, erosion-corrosion, and the flexural strength of WC -Co hardmetals », *J. Mater. Sc.*, Vol. 26, 1991, pp. 1605-1608. <http://dx.doi.org/10.1007/bf00544670>
- [65] **A. Hara et al.** « Corrosion and oxidation resistance of Igetalloy », *Sumitomo Electric Technical Rev.*, Vol. 13, 1970, pp 40-51.
- [66] **Bouchnak, T. B. (2010).** Etude du comportement en sollicitations extrêmes et de l'usinabilité d'un nouvel alliage de titane aéronautique: le ti555-3 (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [67] **Rech, J. (2002).** Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures à la fraise-mère à grande vitesse (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [68] **F. Bagur,** « Matériaux pour outils de coupe », *Technique de l'ingénieur, traité génie mécanique*, Paris, 2005.
- [69] **Pauthenet, R. (1958).** Les propriétés magnétiques des ferrites d'yttrium et de terres rares de formule $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{M}_2\text{O}_3$. In *Annales de Physique* (Vol. 13, No. 3, pp. 424-462). EDP Sciences.
- [70] **Velay, V. (2003).** Modélisation du comportement cyclique et de la durée de vie d'aciers à outils martensitiques (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- [71] **Kremer, A. (2009).** Étude du choix structurel d'outils coupants en diamant revêtu ou polycristallin massif pour l'usinage compétitif et environnemental des composites à matrice métallique et renfort céramique particulaire (CMMP Al/SiC.) (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [72] **Moussaoui, I. (2010).** Etude théorique de quelques combinaisons chimiques dans les matériaux métalliques.
- [73] **Wouters, P., Sips, F., & Magain, P. (2000).** Un nouvel outil pour l'étude des interactions tôle-outil-lubrifiant: Le test en cadence. *Mécanique & industries*, 1(5), 457-464.

- [74] **Labidi, C. (2006).** Amélioration de la durée de service d'outils d'usinage du bois par traitements de surface et préparation de l'arête de coupe (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [75] **POUR, P. (2009).** Etude de l'usure des outils de coupe traités dans le domaine de l'usinage du bois (Doctoral dissertation, Université de Pau, France).
- [76] **Benayoun, S., & Hantzpergue, J. J. (2004).** Les tests d'adhérence appliqués aux revêtements minces: une synthèse bibliographique. *Matériaux & Techniques*, 92(10-11-12), 23-32.
- [77] **Tlili, B. (2010).** Caractérisation de films durs multicouches élaborés par pulvérisation magnétron. Influence des conditions d'élaboration sur leurs propriétés (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [78] **Nouveau, C. (2001).** Etude de revêtements durs (CRxNy) obtenus par méthodes PVD: réalisation et caractérisations: applications à l'usinage du bois (Doctoral dissertation, Paris. ENSAM).
- [79] **Benlatreche, Y. (2011).** Contribution à l'amélioration de la durée de vie d'outils carbure pour l'usinage du MDF (Medium Density Fiberboard) par application de dépôts ternaires (CrAlN, CrVN) et modification de l'arête de coupe (Doctoral dissertation, Arts et Métiers ParisTech).
- [80] **Zemzemi, M. (2006).** Nano-indentation et matière ultra-dure: propriétés mécaniques d'une nano-couche de silicium: étude des polymorphes et des composés binaires de l'osmium (Doctoral dissertation, Paris 7).
- [81] **Lehbil, H. (2010).** Etude de l'influence de l'azote et du recuit thermique sur les propriétés de films minces de nitrure de chrome.
- [82] **RAHIL, I., CHEKOUR, L., ACHOUR, S., & ZARKOUT, S. (2016).** ELABORATION PAR RF MAGNETRON ET CARACTERISATIONS DES REVETEMENTS DURS Mo-Cr-N. *Sciences & Technologie A*, (43), 15-18.
- [83] **Rahil, I.** Elaboration et caractérisation de revêtements durs Mo-Cr et Mo-Cr-N.
- [84] **Vendrell, L. C., Gil, L. C., Montalà, F., Nisio, P., & Bentivegna, S. (2005).** Revêtements CVD pour l'emboutissage d'aciers à haute résistance.
- [85] **Billard, A., & Perry, F. (2005).** Effets de couleur par la mise en oeuvre de revêtements PVD sur le verre. *Traitement thermique*, 363, 29-33.
- [86] **UCHIDA M., NIHIRA N., MITSUO A., TOYODA K., KUBOTA K., AIZAWA T.,** *Surface and Coatings Technology* 177-178 (2004) 627- 634.
- [87] **Benghersallah, M., Boulanouar, L., & Mahfoudi, S. D. (2007, November).** Examen morphologique de l'usure des plaquettes carbure métallique en fraisage. Conférence Internationale sur la Productique.
- [88] **Sampic, J. (2005).** Evolution de la qualité de l'air en France.
- [89] <http://www.industrie-mag.com/article3072.html>.
- [90] **Benchiheb, S. (2010).** راتخم ي جاد تعماد-تبادع (Doctoral dissertation, Université de Annaba).
- [91] **Achour, A. (2006).** Etude du comportement en usure des outils de coupe en fonction du revêtement.

Résumé

Le travail développe la méthode originale de choix d'un matériau des outils et des conditions de coupe en vue de l'usinage et il s'appuie sur la rédaction systématique de pages démarche, de guides de choix et de fiches de données. C'est l'approche produit/procédé/matériau qui a été choisie comme fil conducteur pour la construction de notre travail. Elle est appliquée à la pièce, au travers du cahier des charges consigné par son dessin de définition, au procédé d'usinage par enlèvement de copeaux et aux matériaux métalliques industriels. Ouvrage de notre travail, il est destiné aux ingénieurs en mécanique, du bureau d'études à l'atelier, comme il donne une analyse du cahier des charges de la pièce jusqu'au choix des outils et des conditions de coupe en vue de son usinage, en passant par le choix d'un matériau et de ses traitements, ainsi il rappelle les notions de base de définition et d'usage des principaux matériaux et revêtements, pour les outils de coupe en usinage. Dans le but d'apporter un éclairage, et pour faciliter la tâche de nos ingénieurs.

ملخص

يعمل هذا العمل على تطوير الطريقة الأصلية لاختيار مادة الأداة وظروف القطع الخاصة بالقطع، ونعتمد هنا على الصياغة المنهجية والأدلة البيانية. بواسطة النهج الاتي (المنتج/ العملية / المادة) الذي تم اختياره كخيط توجيهي لبناء عملنا. يتم تطبيقه على القطعة، بواسطة المواصفات المسجلة التي يحددها الرسم التعريفي ، وعملية التصنيع عن طريق إزالة الرقائق والمواد المعدنية الصناعية. ومجهودنا في هذا العمل ، فهو مخصص للمهندسين الميكانيكيين بواسطة نقل المعلومات من مكتب التصميم إلى ورشة العمل حيث يقدم تحليلاً للمواصفات الفنية لأجل اختيار الأدوات وظروف القطع بالآلات ، من خلال اختيار المادة ومعالجاتها وتذكر المفاهيم الأساسية لتعريف واستخدام المواد الرئيسية والطلاء ، لأدوات القطع في الآلات. من أجل الوضوح ، وتسهيل مهمة مهندسينا.

Summary

The work develops the original method of selecting a tool material and cutting conditions for machining and it relies on the systematic drafting of pages approach, choice guides and data sheets. It is the product / process / material approach that has been chosen as the guiding thread for the construction of our work. It is applied to the part, through the specifications recorded by its definition drawing, the process of machining by chip removal and industrial metal materials. Work of our work, it is intended for mechanical engineers, from the design office to the workshop, as it gives an analysis of the specifications of the room until the choice of tools and cutting conditions for its machining, through the choice of a material and its treatments, it recalls the basic concepts of definition and use of the main materials and coatings, for cutting tools in machining. In order to provide lighting, and to facilitate the task of our engineers.