

Chapitre III : Usinage dur et usinage à sec – l'usinabilité des matériaux

Tournage dur

Le tournage des aciers d'une dureté supérieure à 45 HRc, de manière typique dans la plage 55 à 68 HRc, s'appelle le tournage dur. C'est une alternative économique à la rectification. Le tournage dur s'est avéré capable de réduire les temps d'usinage et les coûts de plus de 70 % tout en apportant plus de flexibilité, une qualité plus élevée et des temps de production moins longs.



- Process de production plus simple, semblable au tournage conventionnel.
- Utilisation flexible des machines. Les mêmes machines servent pour le tournage extérieur et intérieur.
- Productivité accrue.
- Coût à la pièce plus faible.
- Pièces de forme complexes usinée en un seul montage.
- Respect de l'environnement : pas d'arrosage, pas de résidus de rectification.

Pièces



Les pièces couramment usinées par tournage dur sont, par exemple, les rotors de freins, les pignons de transmission, les rotules de direction, les sièges de soupapes, les pistons, les chemises de cylindres et les carters d'embrayage...etc.

Matériaux de coupe : la céramique peut être utilisée avec des matières d'une dureté de 50 à 60 HRc environ s'il n'est pas nécessaire d'avoir de très bons états de surface.

Pour l'usinage des alliages (à base nickel et autres), on utilise :

- CC620 : Céramique à base d'oxyde pour la finition à grande vitesse des fontes grises dans des conditions stables à sec.

- CC650 : Céramique mélangée pour la finition à grande vitesse des fontes grises et des matières trempées. Finition à grande vitesse dans des conditions stables. Convient aussi pour les opérations de semi-finition des alliages et les superalliages réfractaires dans des applications plus ou moins instables c.a.d si les besoins en ténacité sont peu élevés.
- CC670 : Céramique à whiskers (à moustache ou contenant des particules) avec excellente ténacité pour le tournage, les gorges et le fraisage des alliages à base Ni. Peut aussi servir pour le tournage dur sous conditions défavorables. Ebauche à semi-finition, coupes interrompues
- CC6050 : Céramique mélangée pour la finition légère continue dans les matières trempées. Semi-finition, coupes continues.
- CC6060 : Nuance Sialon pour des performances optimisées en tournage de superalliages réfractaires pré usinés sous conditions stables. Usure prévisible en raison de la bonne résistance à l'usure en entaille.
- CC6065 : Sialon renforcé pour le tournage des superalliages réfractaires exigeant des plaquettes tenaces (Le **sialon** est l'acronyme de *silicon-aluminum-oxygen-nitride*, c'est une céramique [réfractaire](#) à base de [silicium](#), d'[aluminium](#), d'[azote](#) et d'[oxygène](#) (oxynitride de silicium et d'aluminium).
- CC6090 et CC6190 : Nuance nitrure de silicium pour le tournage ébauche à finition et le fraisage grande vitesse à sec des fontes, des fontes nodulaires perlitiques et des fontes trempées.

Mais les nuances au nitrure de bore cubique (CBN) sont les mieux adaptées au tournage dur. Elles ne doivent toutefois pas être utilisées pour des aciers d'une dureté inférieure à environ 48 HRc. Les plaquettes modernes multi pointes offrent jusqu'à 8 arêtes.

Les nuances recommandées sont :

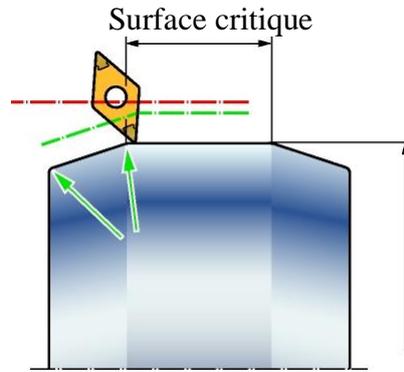
- CB7015 : Coupes continues ou légèrement interrompues.
- CB7025 : Coupes légèrement ou fortement interrompues.
- CB7525 : Coupes fortement interrompues et conditions instables.

Facteurs clés pour le tournage dur

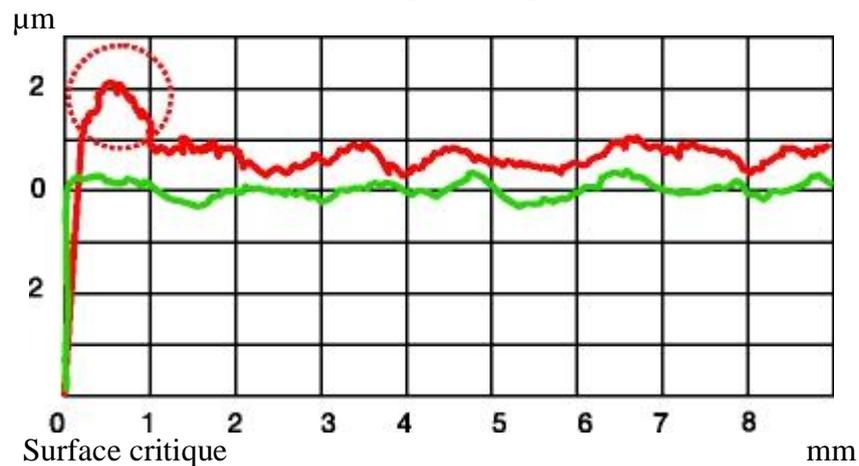
En plus des recommandations générales pour le tournage, certains facteurs spécifiques doivent être soulignés.

Préparation de la pièce avant la trempe :

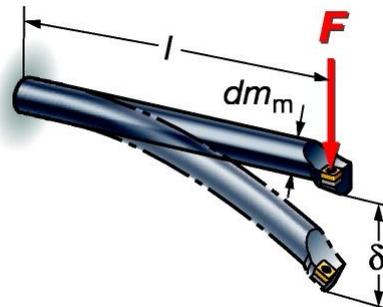
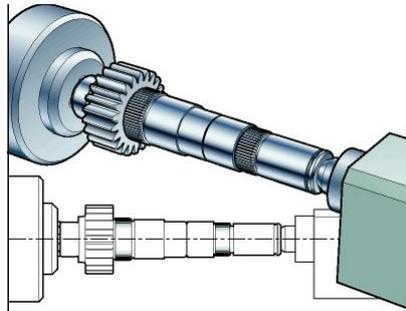
- Eviter les bavures
- Produire des cotes proches de la tolérance
- Usiner les chanfreins et produire les rayons avant la trempe
- Eviter les entrées ou sorties abruptes de la matière
- Entrer ou sortir de la matière par interpolation.



Déviation du diamètre (défaut géométrique)



Montage

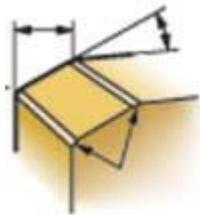


- Il est impératif d'avoir une bonne stabilité machine, un bridage sûr et un bon alignement de la pièce.
- En règle générale, un rapport longueur-diamètre de pièce de 2:1 est acceptable pour les pièces serrées à une seule extrémité. Avec une contrepointe, ce rapport peut être plus élevé.
- Pour une meilleure stabilité dimensionnelle, la broche et la contrepointe doivent être symétriques sur le plan thermique.
- Utiliser les porte-à-faux les plus petits possibles pour une meilleure rigidité du process.
- Envisager l'utilisation d'une barre d'alésage carbure pour le tournage intérieur.

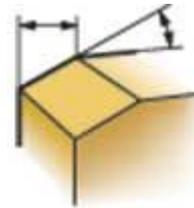
Micro géométrie de plaquette

Il existe deux sortes de géométries d'arête pour les plaquettes CBN :

- Type S : La meilleure résistance d'arête. Résistance au micro écaillage et états de surface de qualité constante.
- Type T : États de surface optimaux dans les coupes continues et peu de bavures dans les coupes interrompues. Forces de coupe plus faibles.



Type S
Chanfrein avec léger rodage



Type T
Chanfrein sans rodage

Géométrie des inserts (plaquettes)

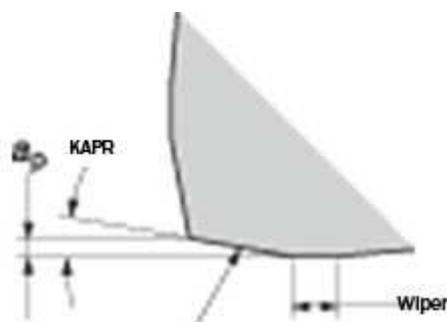
Si les conditions sont stables, toujours utiliser une géométrie wiper pour obtenir une meilleure productivité.

- Géométrie WG pour la semi-finition.
- Géométrie WH pour la finition.

La géométrie Xcel est un bon complément pour la finition.

N'utiliser un rayon de bec normal que si la stabilité est mauvaise (pièce mince, etc.).

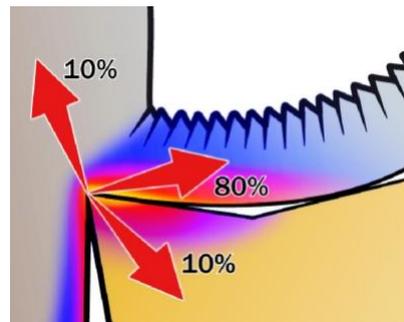
Géométrie Xcel



Il est possible d'éliminer l'arrosage

Le tournage dur se fait à sec, dans l'idéal, ce qui est tout à fait possible. Les plaquettes CBN ou céramique supportent des températures élevées et cela permet d'éliminer le coût du liquide de coupe ainsi que les difficultés associées.

Certaines applications peuvent nécessiter un arrosage, notamment s'il faut contrôler la stabilité thermique de la pièce. Dans ce cas, il convient d'appliquer un arrosage continu pendant toute l'opération.



En général, la chaleur produite par l'usinage se répartit dans les copeaux (80%), la pièce (10%) et la plaquette (10%). C'est pour cela qu'il est important d'évacuer les copeaux de la zone de l'arête de coupe.

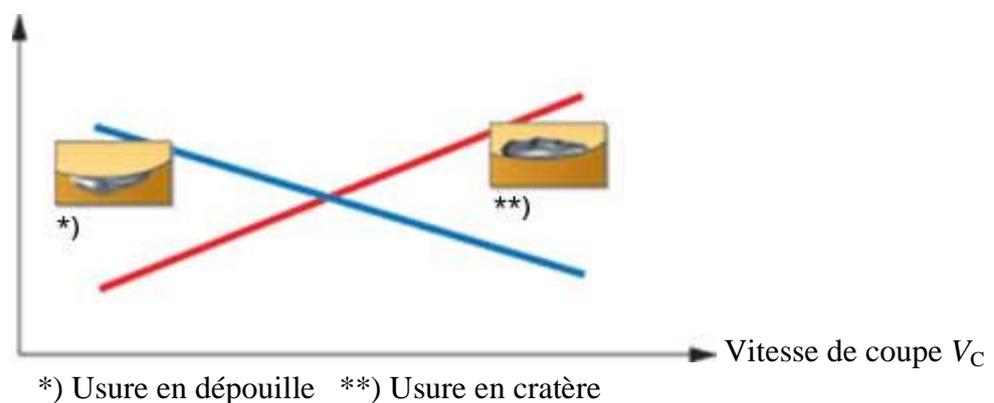
Conditions de coupe et usure

Une élévation importante de la température dans la zone de coupe réduit les forces de coupe. Une vitesse de coupe trop faible ne génère pas suffisamment de chaleur et peut provoquer la rupture de la plaquette.

L'usure en cratère attaque progressivement la résistance de la plaquette, mais elle ne dégrade pas l'état de surface.

Par contraste, l'usure en dépouille a un effet sur les tolérances de cotes.

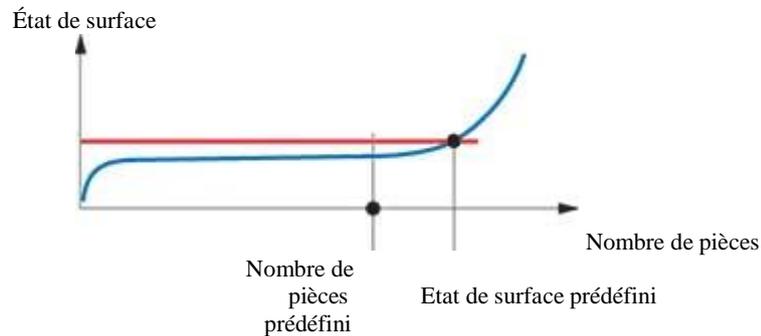
Proportion de l'usure déterminant la durée de vie d'outil



Critères de changement de plaquette

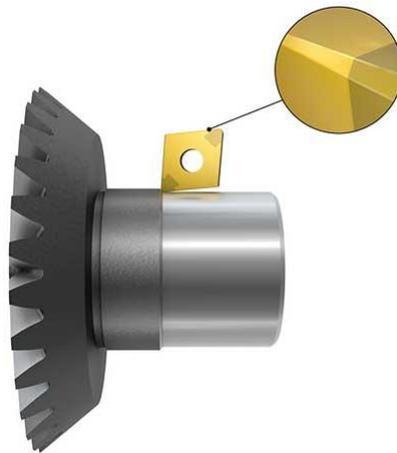
L'obtention d'un état de surface prédéfini est un critère de changement de plaquette fréquent et pratique. L'état de surface est mesuré automatiquement dans un poste séparé et une valeur qualitative est attribuée.

Lorsque la valeur limite est atteinte, il est temps de changer l'outil. Le nombre de pièces doit être inférieur de 10 à 20 % à la durée de vie moyenne de l'outil dans un process optimisé. Le chiffre exact doit être déterminé au cas par cas.



Stratégie en une passe

Il est possible d'appliquer une stratégie en une seule passe tant pour les opérations extérieures qu'intérieures. Il est important que le montage soit stable ; le porte-à-faux de l'outil ne doit pas dépasser le diamètre de la barre pour le tournage intérieur (1xD). Pour de bons résultats, nous recommandons l'utilisation de plaquettes avec chanfrein et léger rodage (type S) ainsi qu'une vitesse et une avance réduites.



Avantages

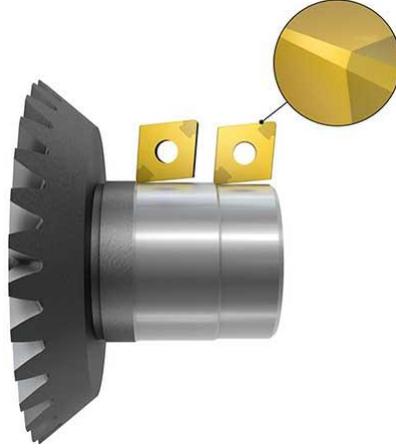
- Temps d'usinage le plus court possible
- Une seule position d'outil.

Inconvénients

- Il est difficile d'atteindre des tolérances dimensionnelles serrées
- Durée de vie d'outil plus courte (par rapport à la stratégie en deux passes)
- Erreurs de tolérances en raison de l'usure assez rapide.

Stratégie en deux passes

Une stratégie en deux passes autorise un usinage sans surveillance et des états de surface de grande qualité. Nous recommandons l'utilisation de plaquettes d'ébauche type S avec un rayon de 1.2 mm (0.047 pouce) et de plaquettes de finition avec chanfrein seul, type T. Ces deux sortes de plaquettes doivent avoir une géométrie Wiper.



Avantages

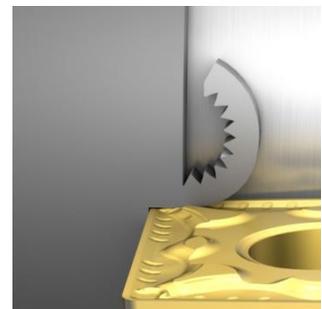
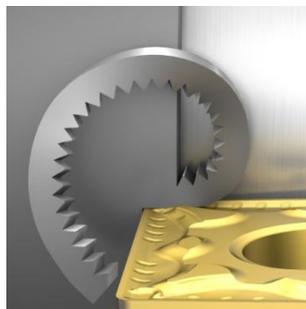
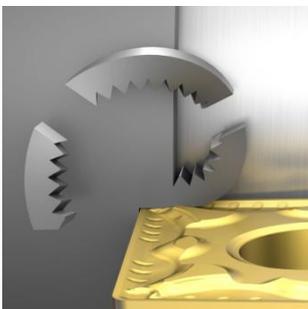
- Outillage optimisé pour l'ébauche et la finition
- Sécurité plus élevée, tolérances plus serrées et séries plus longues entre les changements d'outils

Inconvénients

- Deux plaquettes sont nécessaires
- Deux positions d'outil
- Un changement d'outil supplémentaire.

Bon contrôle des copeaux

Le contrôle des copeaux est l'un des facteurs clés en tournage.



Il existe trois méthodes de fragmentation :

- Fragmentation spontanée, par exemple les fontes
- Fragmentation contre l'outil
- Fragmentation contre la pièce

Les facteurs qui influencent la fragmentation des copeaux sont :

- La géométrie de la plaquette (en fonction de la largeur de l'espace copeau et de la conception de la micro-géométrie et de la macro-géométrie, le copeau est plus ou moins ouvert ou comprimé)
- Le rayon de bec (un petit rayon de bec offre un meilleur contrôle des copeaux qu'un grand)
- L'angle d'attaque (en fonction de l'angle, le copeau est orienté dans différentes directions, vers l'épaulement ou en s'éloignant de l'épaulement)
- La profondeur de coupe (en fonction de la matière de la pièce, la profondeur de coupe influence la fragmentation des copeaux ; plus elle est importante, plus la force pour fragmenter et évacuer le copeau est importante)
- L'avance (une grande avance produit des copeaux plus épais ; dans certains cas, cela favorise la fragmentation et le contrôle des copeaux)
- La vitesse de coupe (une modification de la vitesse de coupe peut influencer la fragmentation des copeaux)
- La matière (les matières à copeaux courts (par ex. les fontes) sont en général faciles à usiner. Avec les matières qui ont une excellente résistance mécanique et une excellente résistance au fluage (tendance à se déformer lentement sous la contrainte, par ex. Inconel) la fragmentation des copeaux pose plus de problèmes)

Liquide de coupe et arrosage

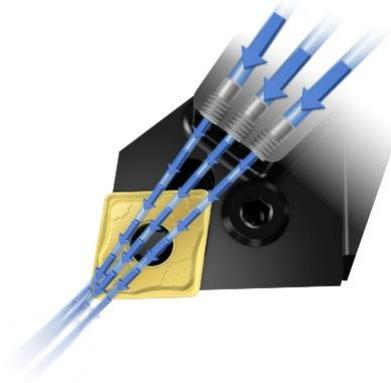
Le rôle primaire du liquide de coupe est le refroidissement et la lubrification de l'outil et de la matière usinée; il assure aussi l'évacuation des copeaux.

Du point de vue de l'environnement comme de celui des coûts de production, il est préférable d'effectuer l'usinage à sec. Mais de nombreuses applications nécessitent l'arrosage pour obtenir de meilleures tolérances ou de meilleurs états de surface et pour améliorer l'usinabilité. Lorsque l'arrosage est nécessaire, il convient de l'optimiser pour exploiter pleinement son potentiel en réglant convenablement son débit, sa pression et l'étendue de son impact.

Les avantages sont importants pour les opérations de tournage, mais il convient de noter les points suivants :

- Les outils spécialement développés pour les applications avec arrosage haute pression, c'est-à-dire, par exemple, des outils de tournage avec des jets ciblés, sont recommandés pour les applications de finition.
- La pression d'arrosage nécessaire pour fragmenter les copeaux avec les outils de tournage dépend du diamètre des buses d'arrosage, de la matière usinée, de la profondeur de coupe et de l'avance
- Le débit de liquide de coupe nécessaire dépend de la pression et de la surface totale des orifices d'arrosage de l'outil
- Pour les applications d'ébauche et semi-finition, il est recommandé d'utiliser l'arrosage par le dessous si cela est possible. L'arrosage par le dessous contrôle la température dans la zone de coupe, ce qui prolonge la durée de vie de l'outil et rend l'usinage plus prévisible. Pour les opérations de finition, il est recommandé d'utiliser à la fois l'arrosage de précision et l'arrosage par le dessous.

Correctement appliqué, l'arrosage améliore les performances de l'outil et la qualité des pièces. Les outils de tournage modernes ont des buses d'arrosage de précision par le dessus afin de contrôler la fragmentation des copeaux et de rendre l'usinage plus sûr. Les outils les plus sophistiqués ont aussi l'arrosage par le dessous pour contrôler la température et pour prolonger leur durée de vie et la rendre plus prévisible.

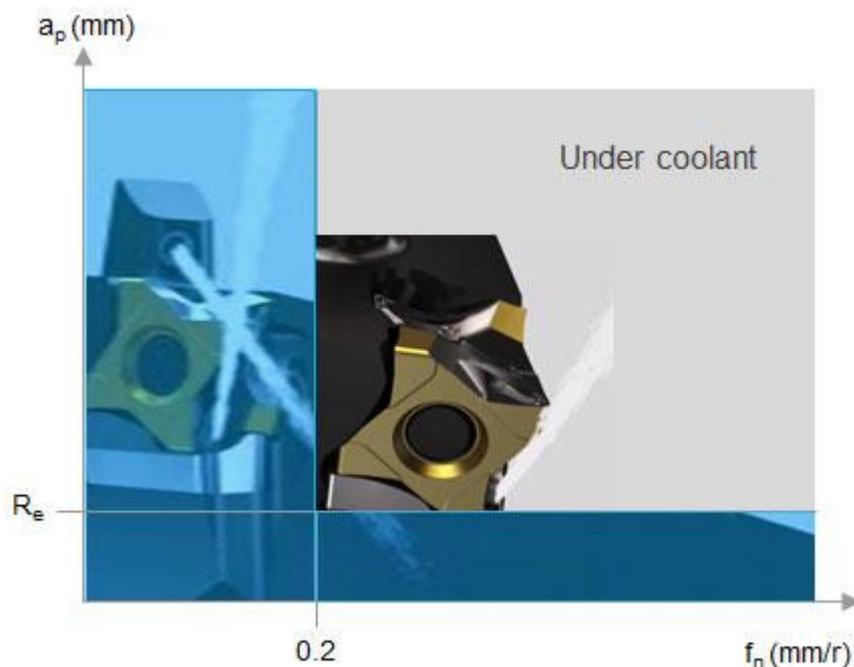


Arrosage par le dessus et le dessous, lequel utiliser ?

Avec les outils qui disposent de l'arrosage par le dessus (de précision) et le dessous, il peut être avantageux de stopper l'arrosage par le dessus dans certaines opérations.

Nota : ces recommandations concernent l'usinage des aciers.

- L'arrosage par le dessus est à appliquer lors de l'usinage à l'intérieur de la zone bleue de a_p et f_n (voire le graphique ci-après).
- En dehors de cette zone, l'arrosage par le dessus peut provoquer une légère usure de l'arête de coupe et augmenter l'usure en cratère pendant l'usinage des aciers
- L'usure en cratère n'est pas toujours facile à évaluer ; la durée de vie de l'outil est plus courte et moins prévisible qu'avec l'arrosage par le dessous ou extérieur.



Outils recommandés dans la zone bleue de l' a_p

- Utiliser des outils qui disposent de l'arrosage par le dessus (de précision) et le dessous
- Utiliser des outils équipés de l'arrosage de précision

Outils recommandés en dehors de la zone bleue de l' a_p

- Utiliser des outils avec arrosage par le dessous, l'arrosage par le dessus (de précision) doit être obstrué
- Utiliser des outils pour plaquettes ISO avec arrosage conventionnel
- Utiliser des outils équipés de l'arrosage de précision et des géométries HP spécifiques (-PMC, -MMC ou -SMC)

Type de liquide de coupe		P	
Finition	Par le dessus	✓	Meilleure fragmentation des copeaux et meilleurs états de surface
	Par le dessous	✓	Meilleure durée de vie de l'outil
Semi-finition	Par le dessus	✗	L'arrosage par le dessus peut avoir des effets négatifs sur les performances (en dehors de la zone d'arrosage de précision HP bleue)
	Par le dessous	✓	Meilleure durée de vie de l'outil
Ébauche	Par le dessus	✗	L'arrosage par le dessus peut avoir des effets négatifs sur les performances (en dehors de la zone d'arrosage de précision HP bleue)
	Par le dessous	✓	Meilleure durée de vie de l'outil

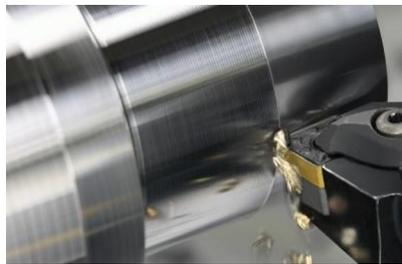


Résolution des problèmes par application correcte de l'arrosage

- Problèmes de contrôle des copeaux : Utiliser l'arrosage par le dessus
- Cotes incorrectes : Ceci est généralement provoqué par une chaleur excessive ; utiliser à la fois l'arrosage par le dessus et par le dessous à une pression aussi élevée que possible
- État de surface de mauvaise qualité : Si le problème est dû aux copeaux, utiliser l'arrosage par le dessus
- Durée de vie d'outil trop courte (dans la zone bleue) : – Utiliser à la fois l'arrosage par le dessus et par le dessous
- Durée de vie d'outil imprévisible dans la zone blanche : Utiliser l'arrosage par le dessous uniquement
- Durée de vie d'outil imprévisible dans la zone bleue : Utiliser l'arrosage par le dessus et par le dessous
- Mauvaise évacuation des copeaux dans les opérations intérieures : Utiliser à la fois l'arrosage par le dessus et par le dessous à une pression aussi élevée que possible

Conditions de coupe

Indications utiles sur les applications



Démarrer avec une faible avance pour assurer la sécurité d'arête et la qualité de surface, augmenter l'avance pour améliorer la fragmentation des copeaux.

Appliquer une profondeur de coupe supérieure au rayon de bec. Ceci réduit la déflexion radiale de la plaquette, c'est important en usinage intérieur.

Une vitesse de coupe trop faible nuit à la durée de vie de l'outil. Toujours appliquer la vitesse de coupe la plus élevée possible, v_c m/min (pieds/min).

Durée de vie

Les trois principaux paramètres des conditions de coupe, la vitesse, l'avance et la profondeur, ont un effet sur la durée de vie de l'outil. Pour prolonger la durée de vie :

1. Optimiser a_p (afin de réduire le nombre de passes)
2. Optimiser f_n (pour réduire le temps de coupe)
3. Optimiser v_c (afin de réduire la chaleur)

Profondeur de coupe, a_p

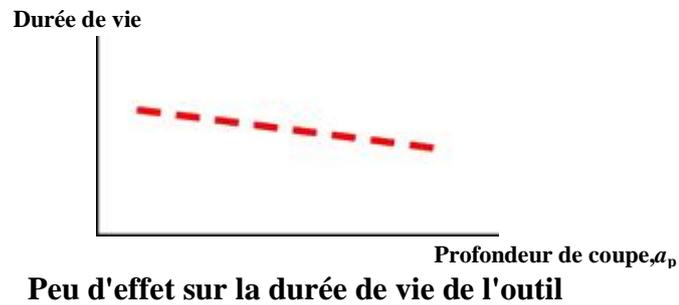
Trop faible

- Mauvais contrôle des copeaux
- Vibrations

- Chaleur excessive
- Coût élevé

Trop grande

- Trop de puissance consommée
- Rupture de plaquette
- Forces de coupe plus grandes



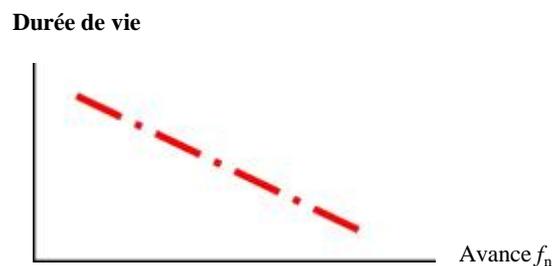
Avance, f_n

Trop faible

- Copeaux enchevêtrés
- Usure en dépouille rapide
- Arête rapportée
- Coût élevé

Trop forte

- Mauvais contrôle des copeaux
- Mauvais état de surface
- Usure en cratère, déformation plastique
- Trop de puissance consommée
- Soudage des copeaux
- Martèlement des copeaux.



Moins d'effet sur la durée de vie de l'outil que V_c

Vitesse de coupe, v_c

Trop faible

- Arête rapportée
- Arête émoussée
- Coût élevé
- État de surface de mauvaise qualité

Trop élevée

- Usure en dépouille rapide
- Mauvais état de surface
- Usure en cratère rapide
- Déformation plastique



Effet important sur la durée de vie de l'outil. Régler V_c pour obtenir les meilleures économies

Usinage des différentes matières

Groupes de matières

Dans l'industrie transformatrice des métaux, il existe un grand nombre de formes de pièces faites dans diverses matières. Chaque matière possède ses propres caractéristiques en fonction des éléments d'alliage qui la composent, des traitements thermiques qu'elle a subit, de sa dureté, etc. Ces différents paramètres ont une très grande importance pour le choix d'une géométrie de coupe, d'une nuance et des conditions de coupe.

Les matières des pièces à usiner sont divisées en 6 grandes familles conformes à la norme ISO. Chacune de ces familles a des propriétés d'usinage spécifiques.

ISO P – Les aciers constituent le groupe de matières le plus courant dans l'industrie transformatrice des métaux. Ces matières incluent les aciers non alliés, les aciers faiblement ou fortement alliés et les aciers coulés. Leur usinabilité est généralement bonne mais elle varie beaucoup en fonction de la dureté, de la teneur en carbone, etc.



ISO M – Les aciers inoxydables sont des matières alliées avec une teneur en chrome de 12 % minimum. Ils peuvent aussi contenir du nickel et du molybdène. Ils peuvent être dans différents états, par exemple ferritique, martensitique, austénitique et austénitique-ferritique (duplex). Les aciers inoxydables représentent donc une grande famille de matières. Celles-ci possèdent toutefois des caractéristiques communes du point de vue de l'usinage étant donné qu'elles génèrent beaucoup de chaleur au niveau de l'arête de coupe ainsi qu'une usure en entaille et des arêtes rapportées.

M

ISO K – Contrairement aux aciers, les fontes sont des matières à copeaux courts. Les fontes grises (GCI) et les fontes malléables (MCI) sont relativement faciles à usiner. Les fontes nodulaires (NCI), les fontes vermiculaires (CGI) et les fontes bainitiques (ADI) se travaillent moins bien. Toutes les fontes contiennent du carbure de silicium (SiC) qui provoque une forte abrasion des arêtes de coupe.

K

ISO N – Les matières non ferreuses comme l'aluminium, le cuivre, le bronze, etc., ont une dureté réduite. L'aluminium est très abrasif lorsqu'il a une teneur en silicium (Si) de 13 %. En général, les plaquettes avec des arêtes vives ont une longue durée de vie dans ces matières et il est possible d'appliquer une vitesse de coupe élevée.

N

ISO S – Les superalliages réfractaires regroupent un grand nombre de matières fortement alliées à base de fer, de nickel, de cobalt et de titane. Elles sont très collantes et sujettes à l'écaillage en coupe. Elles produisent beaucoup de chaleur lors de la coupe. En cela, elles sont proches du groupe ISO M, mais sont plus difficiles à couper et la durée de vie des outils est plus courte.

S

ISO H – Ce groupe inclut les aciers d'une dureté comprise entre 45 et 65 HRc et les fontes en coquille dont la dureté se situe dans la plage 400 à 600 HB. Leur dureté rend ces matières difficiles à usiner. Elles génèrent une chaleur élevée à la coupe et sont très abrasives pour les arêtes de coupe.



Usinabilité des matériaux

L'**usinabilité** désigne la possibilité d'usiner une matière. Cette notion s'applique à un **couple outil-matière** (COM). Elle intègre des notions de performance, en particulier la capacité à réaliser la forme définie en une durée raisonnable, mais aussi d'usure d'outil (et donc sa durée de vie), de consommation d'énergie, et globalement de coût de fabrication. L'usinabilité prend en compte les paramètres de :

- métallurgie : composition du matériau, microstructure ;
- mécanique : résistance à la rupture (dureté), allongement à la rupture, taux d'écaillage ;
- tribologie : frottement entre l'outil et la matière, lubrification, usure ;
- thermique : dissipation de la chaleur.

Pour l'usinage, on définit :

- ❖ la vitesse de coupe v_c : elle est reliée à la fréquence de rotation n par la relation :

$$n(\text{Hz}) = \frac{v_c \text{ (m/s)}}{2 \cdot \pi \cdot r \text{ (m)}} ; \quad n(\text{tr/min}) = \frac{1000 \cdot v_c \text{ (m/min)}}{\pi \cdot D \text{ (mm)}}$$

où r est le rayon de coupe et D le diamètre de coupe (diamètre du foret ou de la fraise, diamètre de la pièce à tourner), soit :

$$v_c \text{ (m/min)} = \frac{\pi \cdot D \text{ (mm)} \cdot n \text{ (tr/min)}}{1000} ;$$

- ❖ la vitesse d'avance de l'outil v_f :

$$v_f = n \cdot f_n$$

où f_n est l'avance par tour, habituellement exprimé en millimètre par tour (mm/tr) ;

- ❖ la profondeur de coupe a , exprimée habituellement en mm ;
- ❖ la puissance absorbée P (partie utile de la puissance de broche).

On peut ainsi définir le débit de copeau Q , habituellement exprimé en cm^3/min :

$$Q = v_c \times a \times f_n$$

et l'énergie spécifique de coupe W_c :

$$W_c = P/Q.$$

Pour chaque couple outil-matière, on trace un faisceau de courbes $W_c = f(v_c)$ pour différentes avances par tour f_n . Ces courbes permettent de déterminer la plage de vitesses de coupe pour le COM.

L'usinabilité dépend beaucoup de l'énergie de rupture du matériau, puisque l'usinage consiste à « arracher » de la matière. Dans le cas de matériaux présentant des changements de phase, on a intérêt à effectuer les opérations d'usinage dans les conditions où le matériau est le plus « tendre ». Par exemple, dans le cas d'une pièce d'acier destinée à être trempée, on a intérêt à faire le plus d'opérations d'usinage possible à l'état recuit; cependant, la trempe provoquant des déformations, si l'on veut des géométries précises, les dernières phases d'usinage doivent se faire à l'état trempé. Il en est de même pour le *traitement de surface* : puisque l'usinage enlève la partie superficielle de la matière, le traitement de surface ne peut normalement se faire qu'après usinage, mais ce traitement peut modifier la géométrie de la surface.

L'usinage provoque des modifications métallurgiques en surface, en raison de l'érouissage et de l'échauffement, ainsi que des contraintes résiduelles. Celle-ci peuvent poser des problèmes de *fatigue* ou de *corrosion*. Dans certains cas, il peut être nécessaire d'effectuer un recuit après usinage.

Lorsque l'on désire faire de la production en masse et que les autres propriétés du matériau ne sont pas critiques, on peut utiliser des matériaux à usinabilité améliorée. Pour les aciers par exemple, on utilise de faibles teneurs en soufre (le soufre étant par ailleurs un élément fragilisant), le but étant d'avoir des *précipités de sulfure de manganèse* qui favorise la fragmentation du copeau et évite d'avoir un copeau « filant ». La présence de plomb peut être utilisé comme élément d'alliage : ayant un bas *point de fusion*, il permet de former une couche lubrifiante. On parle en général « d'aciers de décolletage ».