

Lavorazioni per asportazione di truciolo

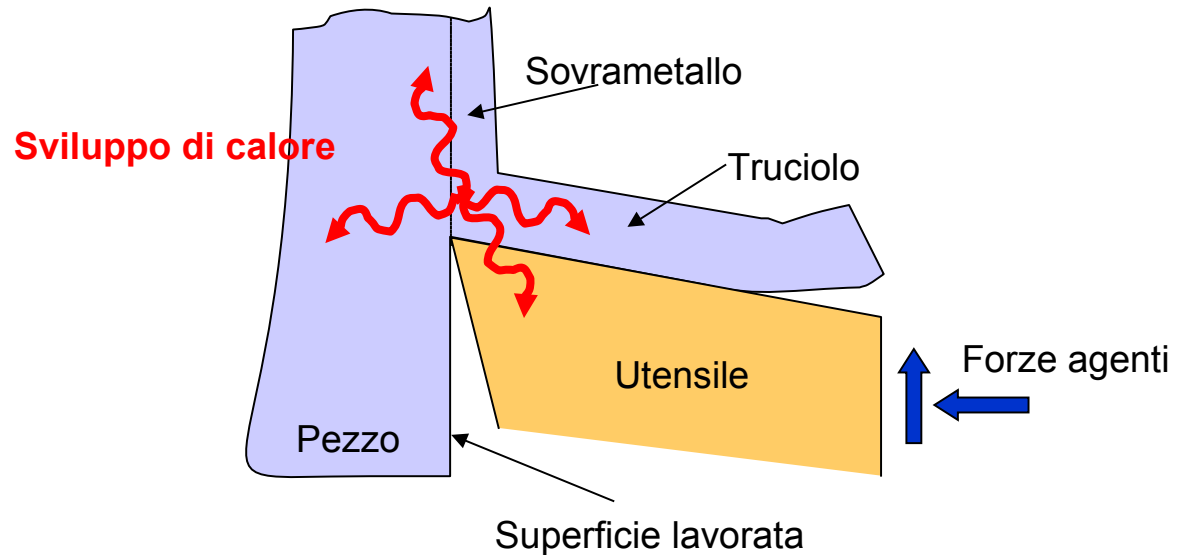
Università degli Studi di Trieste

Introduzione

Generalità

Processo di taglio

Nel processo di taglio un **utensile**, dotato di un moto relativo rispetto ad un **pezzo** generato da una **macchina utensile**, ne asporta uno strato superficiale mediante un processo di deformazione plastica. Ne risulta una nuova superficie avente le caratteristiche richieste ed espresse sul disegno del pezzo.



Introduzione

Gli elementi fondamentali del processo di taglio sono i seguenti:

- **Pezzo in lavorazione:** generalmente un grezzo di fusione o un semilavorato laminato.
- **Macchina utensile:** genera i moti relativi pezzo-utensile e le forze necessarie per l'azione di taglio.
- **Utensile:** di opportuna geometria e durezza, esegue l'azione di taglio vera e propria mediante un processo di deformazione plastica.
- **Attrezzatura:** serie di dispositivi mediante i quali il pezzo viene fissato alla macchina utensile; il loro scopo è anche quello di ricevere e reagire alle forze di taglio e fare in modo che il pezzo non si muova o si deformi durante la lavorazione.

La lavorazione viene effettuata a temperatura ambiente, tuttavia il calore generato a causa della deformazione plastica e dei fenomeni d'attrito innalza la temperatura di truciolo, utensile e pezzo.

Taglio ortogonale

Meccanica della formazione del truciolo

Il taglio ortogonale

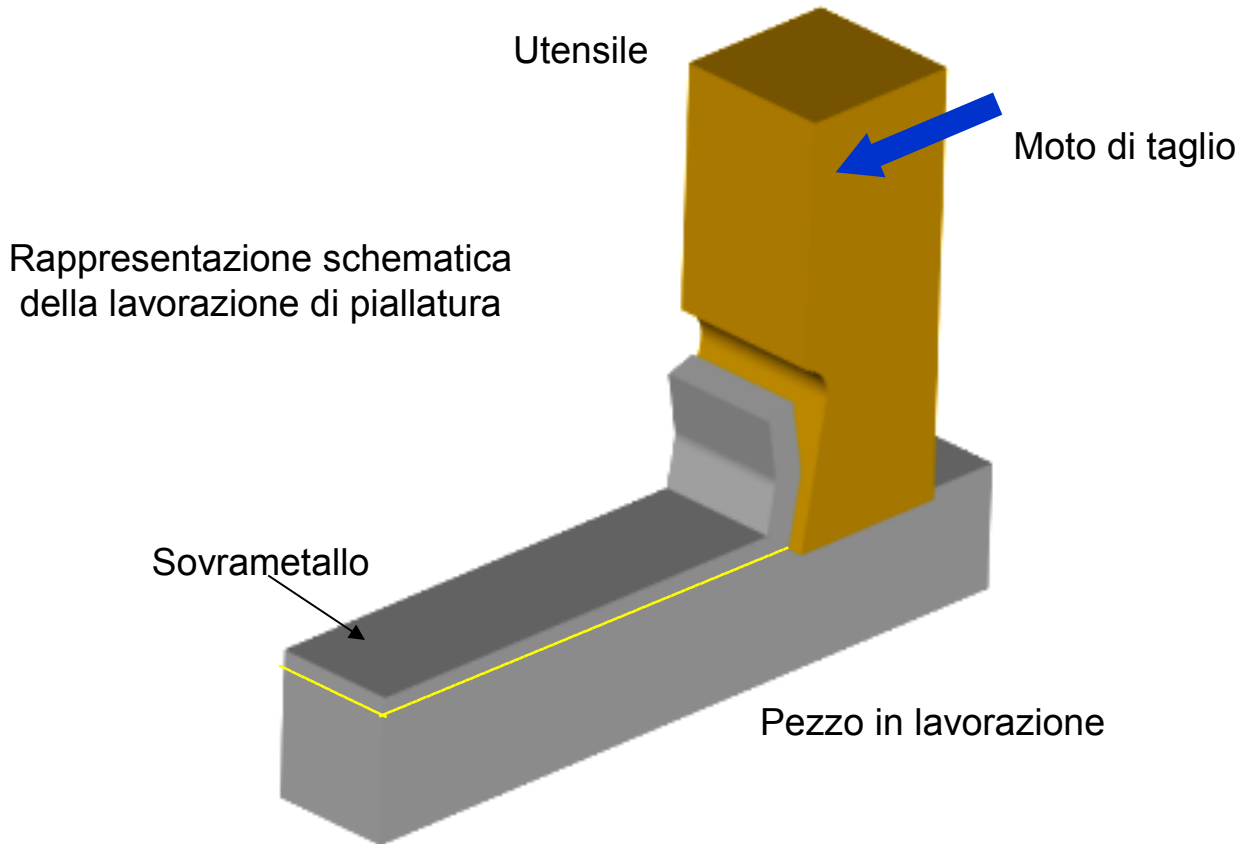
Per studiare la meccanica di formazione del truciolo è conveniente riferirsi al caso particolarmente semplice di taglio ortogonale, ovvero quello in cui il tagliente è rettilineo, parallelo alla superficie in lavorazione ed orientato perpendicolarmente alla direzione di avanzamento. In questo caso (ipotesi):

- ✓ Lo spessore del truciolo è costante.
- ✓ Non si ha deformazione in direzione della larghezza del taglio.
- ✓ Le deformazioni del materiale in lavorazione sono identiche in piani paralleli tra loro.
- ✓ Non sono presenti componenti di forza perpendicolari al piano contenente l'asse l'utensile e la direzione di avanzamento.

Lo studio dei fenomeni può essere perciò ricondotto ad un caso bidimensionale.

Taglio ortogonale

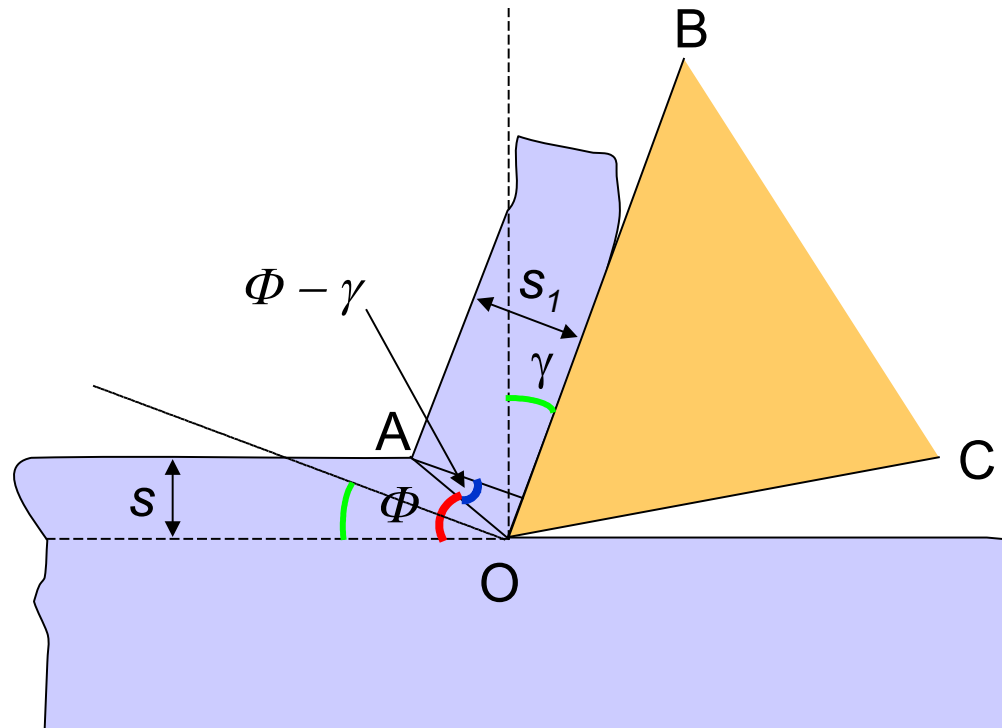
Il tipo di lavorazione ipotizzato nella pratica risulta essere molto raro. Una buona approssimazione si ha, ad esempio, nelle lavorazioni di piallatura, operando con un utensile il cui tagliente sia perpendicolare alla velocità di taglio.



Taglio ortogonale

Geometria

Nella figura seguente è riportata la geometria e la nomenclatura delle dimensioni e degli angoli caratteristici che verranno utilizzati per la formulazione dei modelli:



Taglio ortogonale

Definizioni

Definiamo un parametro importante per lo studio della formazione del truciolo, il **rapporto di taglio**:

$$c = \frac{s}{s_1}$$

Il suo reciproco, $1/c$, è detto **fattore di ricalcamento del truciolo**.

La conservazione del volume (e quindi della massa) del materiale prima e dopo il taglio può venire espressa nel modo seguente:

$$s \cdot l \cdot L = s_1 \cdot l_1 \cdot L_1$$

l, l_1 : larghezza del truciolo prima e dopo il distacco dal pezzo

L, L_1 : lunghezza del truciolo prima e dopo il distacco dal pezzo

Poiché, per ipotesi, $l=l_1$, si ha l'espressione equivalente:

$$s \cdot L = s_1 \cdot L_1$$

Taglio ortogonale

E' possibile scrivere allora:

$$c = \frac{s}{s_1} = \frac{L_1}{L}$$

Si osservi che, per valutare c , essendo noto s , e non potendo misurare con sufficiente affidabilità s_1 , si ricorre ad un metodo indiretto che fa uso della seguente espressione:

$$s_1 = \frac{M}{L_1 \cdot l \cdot \rho}$$

M è il peso del truciolo prodotto, valutabile mediante una semplice bilancia, e ρ è la densità del materiale lavorato.

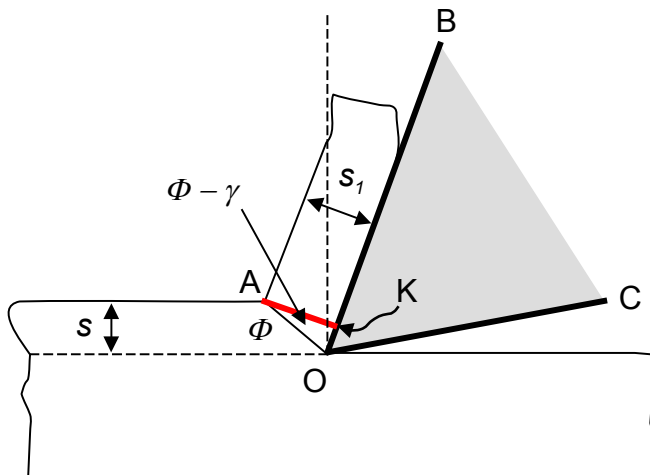
La faccia dell'utensile su cui scorre il truciolo, la cui traccia è rappresentata dal segmento OA è detta **petto dell'utensile**.

L'angolo γ è detto **angolo di spoglia superiore**, mentre l'angolo ϕ è detto **angolo di scorrimento** (o di taglio).

Taglio ortogonale

Il processo di taglio può essere schematizzato nel modo seguente:

- Il tagliente penetra nello spessore s del materiale in lavorazione.
- Le forze di compressione che si generano portano alla deformazione plastica per scorrimento del materiale lungo il piano OA.
- Distacco dello strato metallico sotto l'azione dell'utensile, con conseguente formazione del truciolo.
- Scorrimento del truciolo lungo il petto dell'utensile.



$$c = \frac{s}{s_1} = \frac{AO \cdot \sin(\Phi)}{AO \cdot \cos(\Phi - \gamma)}$$

$$c = \frac{\sin(\Phi)}{\cos(\Phi - \gamma)}$$

Taglio ortogonale

Si osservi ora che, per quanto detto in precedenza, c può essere valutato (anche se con misure indirette), mentre γ è noto dalla geometria dell'utensile. Risulta perciò possibile, utilizzando l'espressione appena ricavata, valutare Φ , angolo di taglio:

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{\sin(\Phi)}{\cos(\Phi - \gamma)} = \frac{\sin(\Phi)}{\cos(\Phi) \cdot \cos(\gamma) + \sin(\Phi) \cdot \sin(\gamma)} = \\
 &= \frac{\operatorname{tg}(\Phi)}{\cos(\gamma) + \operatorname{tg}(\Phi) \cdot \sin(\gamma)} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow c \cdot \cos(\gamma) + c \cdot \operatorname{tg}(\Phi) \cdot \sin(\gamma) = \operatorname{tg}(\Phi) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow \operatorname{tg}(\Phi) = \frac{c \cdot \cos(\gamma)}{1 - c \cdot \sin(\gamma)}
 \end{aligned}$$

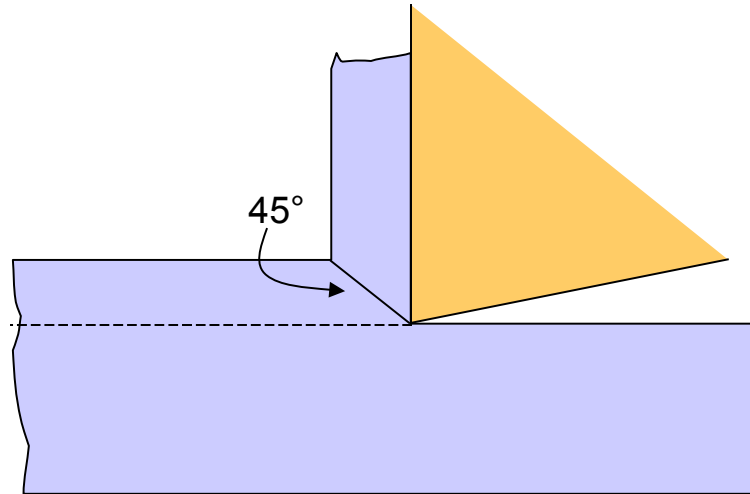
Grandezze note o misurabili

Taglio ortogonale

Per esempio, nel caso in cui $\gamma=0$ e $c=1$ si ha:

$$\operatorname{tg}(\Phi) = \frac{c \cdot \cos(\gamma)}{1 - c \cdot \sin(\gamma)} = \frac{c \cdot 1}{1 - c \cdot 0} = c = 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{\pi}{4} = 45^\circ$$



Modello di Pijspanen

Modello di formazione del truciolo di Pijspanen

E' uno dei modelli più semplici nel caso di materiali plastici. Se il materiale lavorato è fragile, si ha frattura lungo il piano OA anziché deformazione plastica (è il caso, ad esempio, delle ghise, di alcuni bronzi, ecc.).

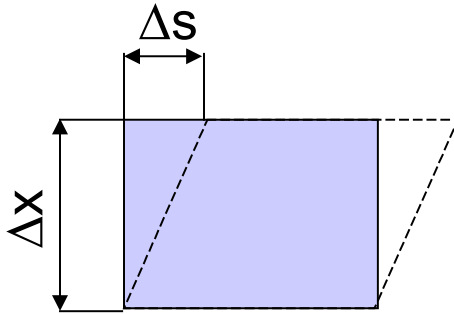
Le ipotesi del modello di Pijspanen sono le seguenti:

- ✓ Taglio ortogonale.
- ✓ Stato stazionario.
- ✓ La deformazione per scorrimento avviene in corrispondenza del piano OA.
- ✓ La deformazione avviene per scorrimento di blocchi rigidi di materiale a forma di parallelogramma.

Si osservi che il modello non considera la presenza delle forze d'attrito nella zona di contatto truciolo-petto dell'utensile; in effetti il modello di Pijspanen è un'elaborazione geometrica del problema di taglio che prescinde dall'imposizione dell'equilibrio delle forze agenti (e questa è in effetti una delle sue limitazioni).

Modello di Pijspanen

Ricordiamo che in una deformazione a taglio si ha:



$$\gamma_s = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{\Delta s}{\Delta x}$$

Nel nostro caso possiamo scrivere il valore della deformazione per scorrimento come:

$$\gamma_s = \frac{\Delta s}{\Delta x} = \frac{ON + NM}{ML} = \frac{ML \cdot \operatorname{tg}(\Phi - \gamma) + ML \cdot \operatorname{ctg}(\Phi)}{ML}$$

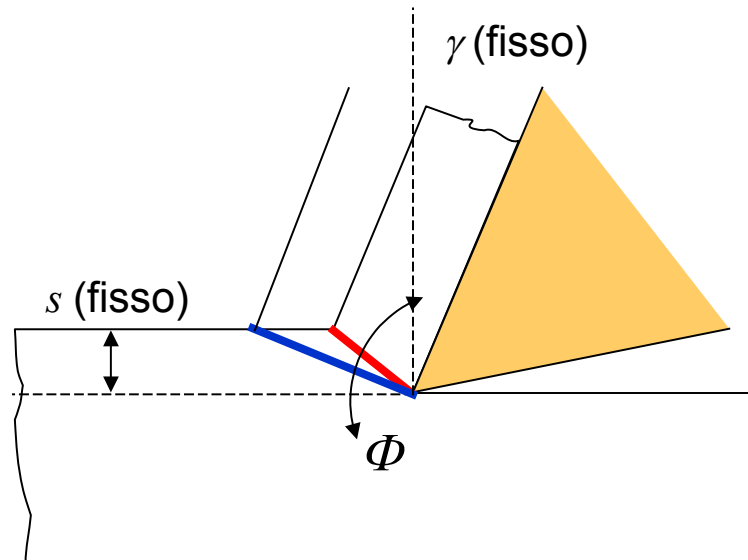
$$\gamma_s = \operatorname{tg}(\Phi - \gamma) + \operatorname{ctg}(\Phi)$$

Modello di Pijspanen

Ne consegue che lo scorrimento è funzione di γ e Φ o, per quanto visto in precedenza, di γ e c , cioè:

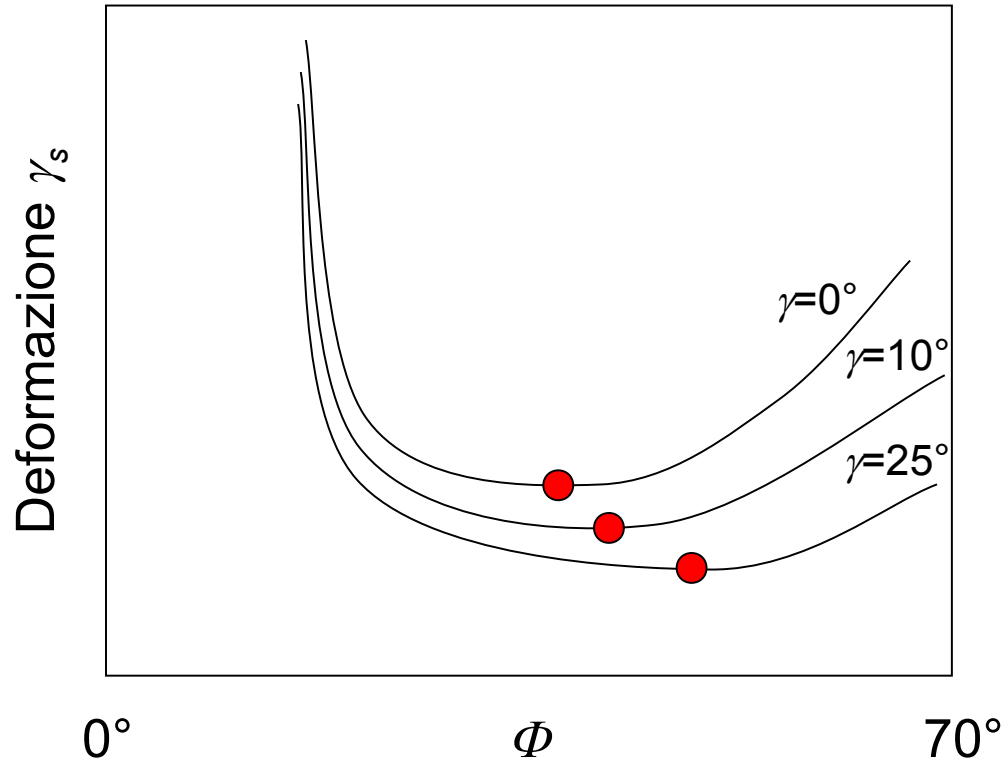
$$\gamma_s = \gamma_s(\gamma, \Phi) = \gamma_s(\gamma, c)$$

Si osservi che, a parità di s e γ , Φ può assumere valori diversi! Per determinarlo si fa uso, appunto di modelli quale quello di Pijspanen.



Modello di Pijspanen

Plottando la funzione γ_s vs Φ , parametrizzata in funzione di γ , si ottengono i seguenti risultati qualitativi:



Modello di Pijspanen

Si osservi che:

La deformazione γ_s aumenta al diminuire dell'angolo di spoglia: di conseguenza aumentano le forze necessarie a provocare tale deformazione. Di ciò bisognerà tenere conto nella scelta delle caratteristiche dell'utensile.

Per ogni valore dell'angolo di spoglia superiore esiste un angolo Φ tale che la deformazione è minima:

$$\frac{\partial \gamma_s}{\partial \Phi} = -\frac{1}{\text{sen}^2(\Phi)} + \frac{1}{\cos^2(\Phi - \gamma)} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{sen}^2(\Phi) - \cos^2(\Phi - \gamma) = 0 \Rightarrow \dots \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2}$$

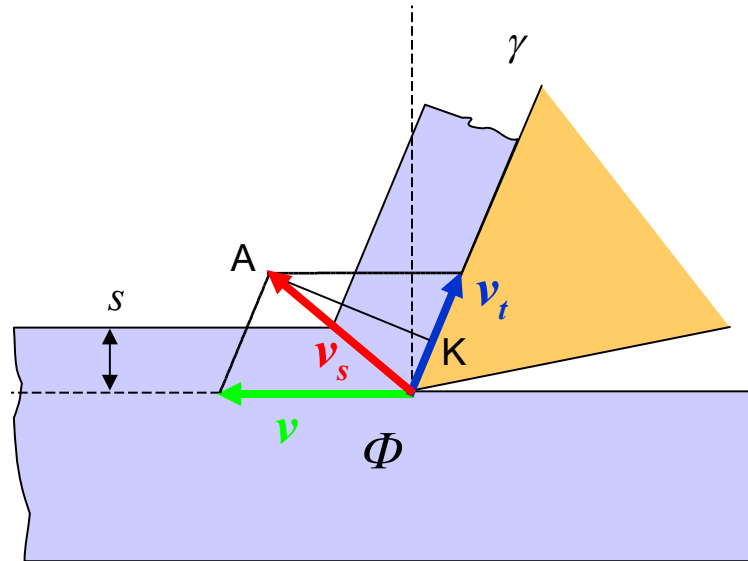
Es.: per $\gamma=0$, si ha $\Phi = 45^\circ$ (e $c=1$).

Modello di Pijspanen

Analisi cinematica

Dette:

- v velocità di taglio
- v_t velocità del truciolo sul petto dell'utensile
- v_s velocità di scorrimento lungo il piano OA



Modello di Pijspanen

Per la conservazione della massa, allo stato stazionario e per le ipotesi fatte, si può scrivere:

$$v_t \cdot s_1 = v \cdot s \Rightarrow v_t = v \cdot \frac{s}{s_1} = v \cdot c$$

Dalla figura rappresentante le tre velocità si può dedurre facilmente anche che:

$$\left. \begin{array}{l} AK = v_s \cdot \cos(\Phi - \gamma) \\ AK = v \cdot \cos(\gamma) \end{array} \right\} \Rightarrow v_s = v \cdot \frac{\cos(\gamma)}{\cos(\Phi - \gamma)}$$

Utilizzando quest'ultima espressione è possibile valutare la velocità di deformazione:

$$\dot{\gamma}_s = \frac{d\gamma_s}{dt} = \frac{d(\Delta s / \Delta x)}{dt} = \frac{d\Delta s}{dt} \cdot \frac{1}{\Delta x} = \frac{v_s}{\Delta x} = \frac{v}{\Delta x} \frac{\cos(\gamma)}{\cos(\Phi - \gamma)}$$

Generalmente Δx è dell'ordine di qualche μm , per cui la velocità di deformazione è molto elevata ($10^2 \div 10^6 \text{ [s}^{-1}\text{]}$).

Modello di Merchant

Modello di formazione del truciolo di Ernst e Merchant

Le ipotesi sono le seguenti:

- ✓ Taglio ortogonale.
- ✓ Stato stazionario.
- ✓ Deformazione plastica per scorrimento lungo il piano OA.
- ✓ Coefficiente d'attrito pari a 0 nel contatto fianco utensile-pezzo.
- ✓ Coefficiente di attrito costante nel contatto petto utensile-truciolo.

L'impostazione del modello prevede:

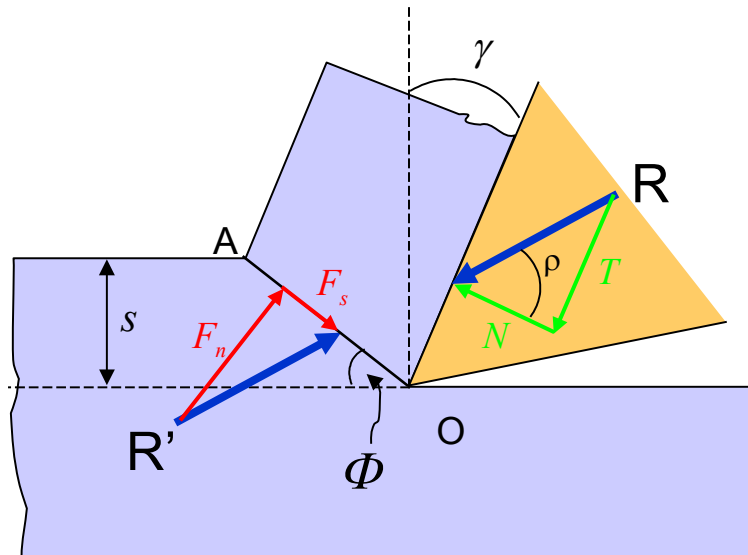
- L'imposizione dell'equilibrio delle forze agenti sul truciolo, includendo il contributo delle forze d'attrito.
- L'applicazione del principio della minima energia (ovvero: il truciolo si forma con un meccanismo –ovvero con una geometria- tale che l'energia necessaria sia quella minima possibile).

Modello di Merchant

Supponiamo di poter trascurare la curvatura del truciolo, ovvero di considerare nullo il momento flettente agente su di esso. Le forze applicate al truciolo OADE saranno:

- ▶ La risultante applicata dal pezzo in lavorazione sul truciolo
- ▶ La risultante applicata dell'utensile sul truciolo

Per quanto detto sopra, tali risultanti si considerano giacenti su una stessa retta.



Equilibrio:

$$R + R' = 0$$

$$M = 0$$

$$M(O') = M(O) + R \times (O - O')$$

Modello di Merchant

In base alla nomenclatura di figura risultano valide le seguenti uguaglianze:

$$\vec{R} = \vec{N} + \vec{T}$$

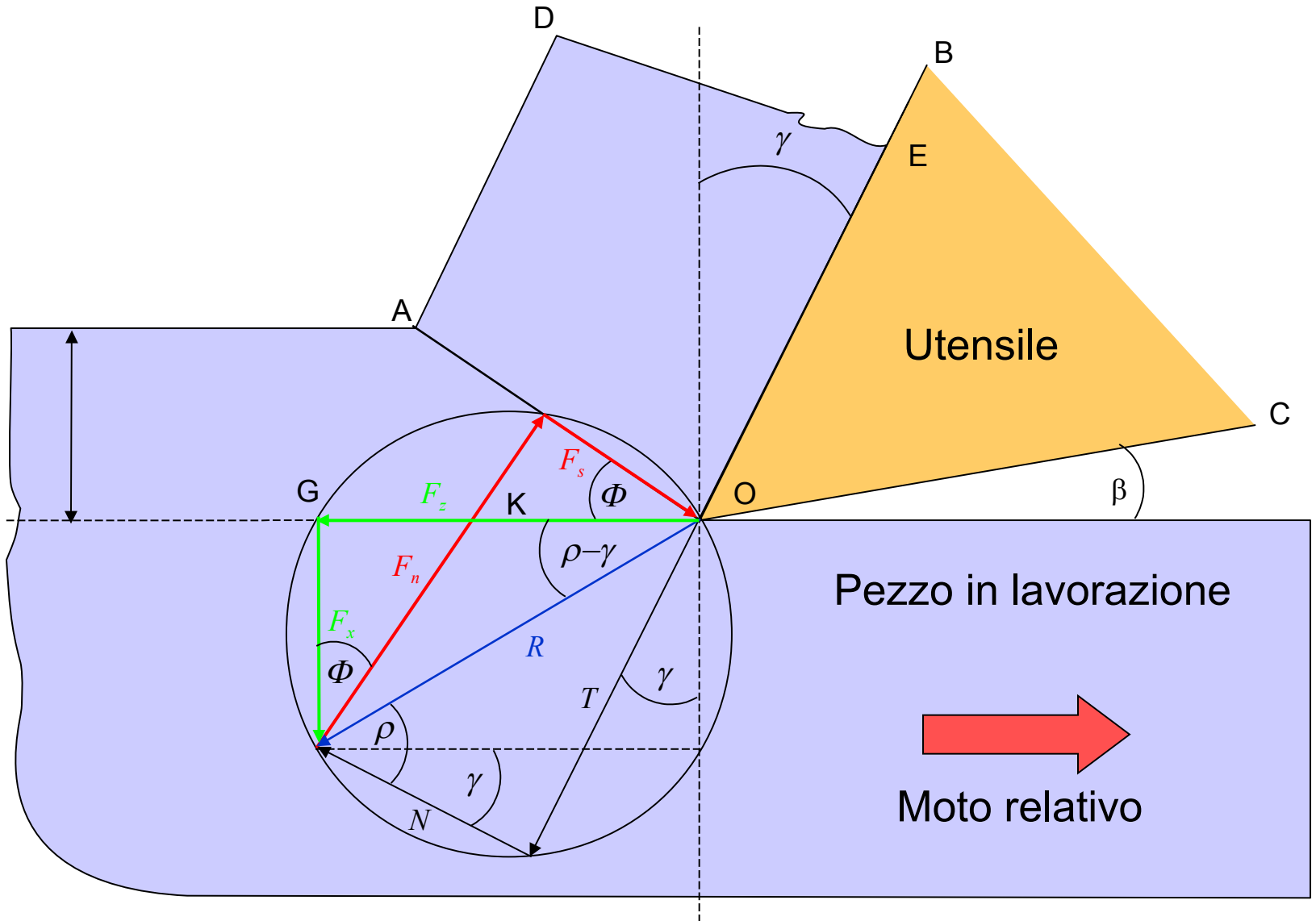
$$\vec{R}' = \vec{F}_s + \vec{F}_n$$

La forza R è la risultante della forza N , perpendicolare al petto dell'utensile e della forza di attrito dinamico data dal contatto truciolo-utensile in condizioni di moto relativo.

Analogamente, la forza R' può essere considerata la risultante della forza di scorrimento F_s , agente sul piano OA , e della forza F_n , normale a tale piano.

Per analizzare più agevolmente il problema, è conveniente supporre R applicata in O e tracciare la circonferenza di diametro R (circonferenza di Merchant).

Modello di Merchant



Modello di Merchant

In base alla nomenclatura di figura risultano valide le seguenti uguaglianze:

$$R = \sqrt{F_z^2 + F_x^2}$$

Dove F_z ed F_x sono rispettivamente le componenti del vettore R in direzione di taglio ed in direzione perpendicolare a quella di taglio.

$$F_z = R \cdot \cos(\rho - \gamma)$$

$$F_x = R \cdot \sin(\rho - \gamma)$$

$$F_s = R \cdot \cos(\Phi + \rho - \gamma)$$

$$F_n = R \cdot \sin(\Phi + \rho - \gamma)$$

Si osservi che F_z ed F_x sono grandezze misurabili mediante un opportuno sistema, ad esempio, di celle di carico applicate al dispositivo portautensile. Interessa pertanto conoscere i legami:

$$F_s = F_s(F_z, F_x) \quad F_n = F_n(F_z, F_x)$$

Modello di Merchant

Per trovare i legami cercati, osserviamo che:

$$F_s = OK \cdot \cos(\Phi) = (OG - GK) \cdot \cos(\Phi) = (F_z - F_x \cdot \operatorname{tg}(\Phi)) \cdot \cos(\Phi)$$

Per cui:

$$F_s = F_z \cdot \cos(\Phi) - F_x \cdot \sin(\Phi)$$

Analogamente:

$$F_n = F_x \cdot \cos(\Phi) + F_z \cdot \sin(\Phi)$$

Inoltre si ha:

$$T = R \cdot \sin(\rho)$$

$$N = R \cdot \cos(\rho)$$

$$T = F_x \cdot \cos(\gamma) + F_z \cdot \sin(\gamma)$$

$$N = F_z \cdot \cos(\gamma) - F_x \cdot \sin(\gamma)$$

Poichè:

$$\mu = \operatorname{tg}(\rho) = \frac{T}{N}$$

Modello di Merchant

Sostituendo le espressioni per T ed N e dividendo numeratore e denominatore per $\cos(\gamma)$ si ottiene un'espressione di μ in funzione di grandezze misurabili:

$$\mu = \frac{F_x + F_z \cdot \operatorname{tg}(\gamma)}{F_z - F_x \cdot \operatorname{tg}(\gamma)}$$

Per la tensione tangenziale di scorrimento e per quella normale (medie) si possono scrivere le seguenti espressioni:

$$\tau_s = \frac{F_s}{\left(\frac{s}{\sin(\Phi)} \right) \cdot l}$$

$$\sigma_s = \frac{F_n}{\left(\frac{s}{\sin(\Phi)} \right) \cdot l}$$

Modello di Merchant

Sostituendo le espressioni per F_s ed F_n ricavate in precedenza, le tensioni possono essere espresse in funzione di grandezze misurabili:

$$\tau_s = \frac{F_z \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(\Phi) - F_x \cdot \sin^2(\Phi)}{s \cdot l}$$

$$\sigma_s = \frac{F_x \cdot \sin(\Phi) \cdot \cos(\Phi) - F_z \cdot \sin^2(\Phi)}{s \cdot l}$$

In alternativa possono essere scritte le seguenti relazioni:

$$\tau_s = \frac{R \cdot \cos(\Phi + \rho - \gamma) \cdot \sin(\Phi)}{s \cdot l}$$

$$\sigma_s = \frac{R \cdot \sin(\Phi + \rho - \gamma) \cdot \sin(\Phi)}{s \cdot l}$$

Modello di Merchant

Come anticipato, nel modello di Merchant viene applicato il principio della minima energia. Si osservi che la forza responsabile del lavoro di taglio è F_z ; la potenza di taglio assorbita è infatti:

$$P = F_z \cdot v \quad [W]$$

Si tratta quindi di trovare il valore di Φ per il quale F_z sia minima. Per fare ciò si può partire dall'espressione seguente:

$$F_z = \frac{F_s \cdot \cos(\rho - \gamma)}{\cos(\Phi + \rho - \gamma)}$$

Tale espressione è ricavabile per semplice sostituzione a partire dalle relazioni fondamentali scritte tra le varie componenti delle forze agenti. Fissato il sistema e la geometria (e quindi ρ e γ), si tratta di minimizzare F_z rispetto a Φ .

Innanzitutto conviene scrivere esplicitamente la dipendenza di F_s da Φ , ricordando l'espressione scritta in precedenza per la tensione tangenziale.

Modello di Merchant

Si ha dunque:

$$F_z = \frac{\tau_s \cdot s \cdot l}{\sin(\Phi)} \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\cos(\Phi + \rho - \gamma)}$$

A questo punto è necessario osservare che τ_s è il flow stress, cioè lo sforzo necessario per provocare lo scorrimento del materiale: esso è indipendente da Φ ed è funzione, per lo più, della temperatura e del grado di incrudimento. In ogni caso, in questo ragionamento semplificato, verrà assunto un valore medio del flow stress (costante). Pertanto il numeratore dell'espressione scritta è costante rispetto a Φ , per cui basta massimizzare il denominatore. Derivando ed uguagliando a 0 si ha:

$$\cos(\Phi) \cdot \cos(\Phi + \rho - \gamma) - \sin(\Phi) \cdot \sin(\Phi + \rho - \gamma) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \cos(2\Phi + \rho - \gamma) = 0 \Rightarrow 2\Phi + \rho - \gamma = \frac{\pi}{2}$$

Si può verificare facilmente che questa è la condizione di minimo calcolando la derivata seconda.

Modello di Merchant

Riassumendo:

- ρ risulta indirettamente misurabile con appositi sistemi dinamometrici
- Φ può essere calcolato noto ρ e la geometria del sistema
- Con i dati dinamometrici e con il valore di Φ così ricavato, tutti gli altri parametri di interesse possono essere valutati.

Inoltre:

- ✓ All'aumentare del coefficiente d'attrito l'angolo di taglio diminuisce (trucioli più "spessi").
- ✓ All'aumentare dell'angolo di spoglia superiore, l'angolo di taglio aumenta (trucioli più "sottili").
- ✓ Il rapporto di taglio è sempre ≤ 1 , infatti:

$$\Phi - \gamma = \frac{\pi}{2} - (\Phi + \rho)$$

$$c = \frac{\sin(\Phi)}{\cos(\Phi - \gamma)} = \frac{\sin(\Phi)}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - (\Phi + \rho)\right)} = \frac{\sin(\Phi)}{\sin(\Phi + \rho)} < 1 \quad \forall \Phi \in [0, \pi/2]$$

Modello di Merchant

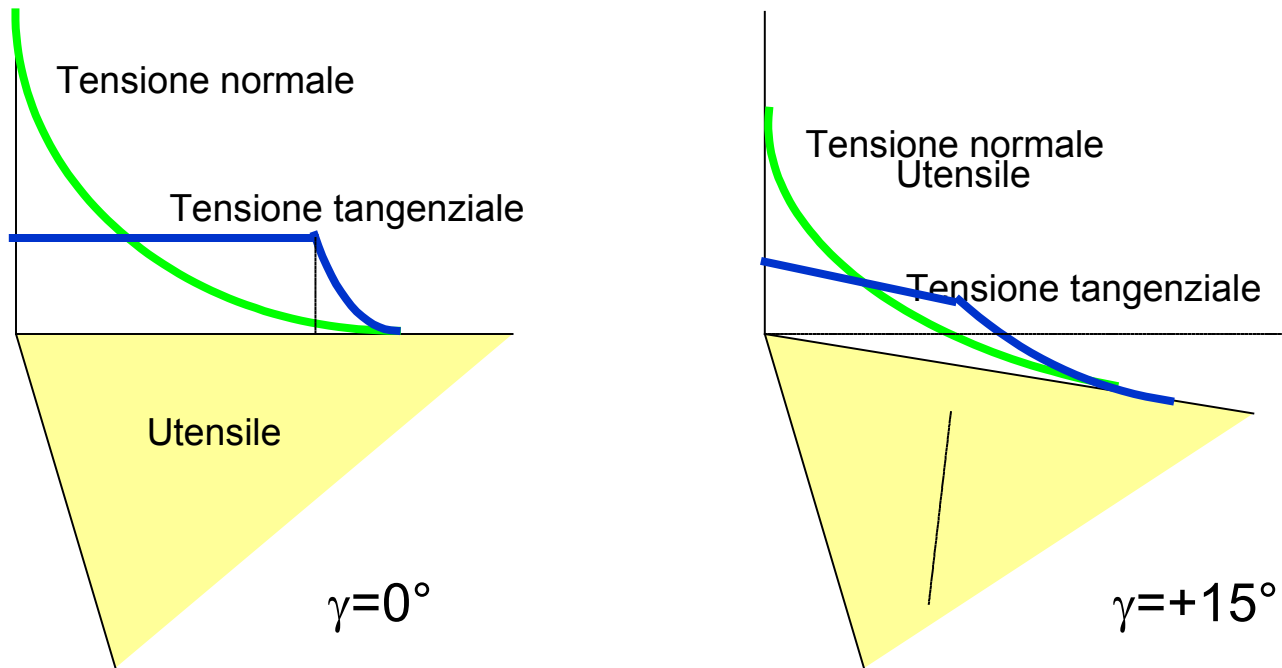
Limiti del modello di Ernst e Merchant

I dati sperimentali si discostano talvolta anche notevolmente da quanto prevedibile con il modello discusso. I motivi principali sono:

- τ_s varia, in modo complesso, con la temperatura e con il grado di incrudimento del materiale, il quale dipende, fra l'altro, dalla velocità di deformazione, come già ampiamente discusso nella sezione dedicata alle lavorazioni per deformazione plastica.
- Il valore del coefficiente d'attrito sul petto dell'utensile può non essere costante e possono insorgere fenomeni di attrito adesivo ($m^*=1$). Come già discusso in precedenza, in questo caso la tensione all'interfaccia è costante (e quindi indipendente dalla tensione normale) ed assume il valore del flow stress del materiale. Nella zona in cui la tensione normale scende al di sotto del valore critico, si ha un normale attrito di scorrimento. L'ampiezza delle due zone dipende, fra l'altro, dal valore dell'angolo di spoglia superiore: all'aumentare di γ il valore medio della tensione normale tende a ridursi e la zona di attrito non adesivo ad estendersi.

Modello di Merchant

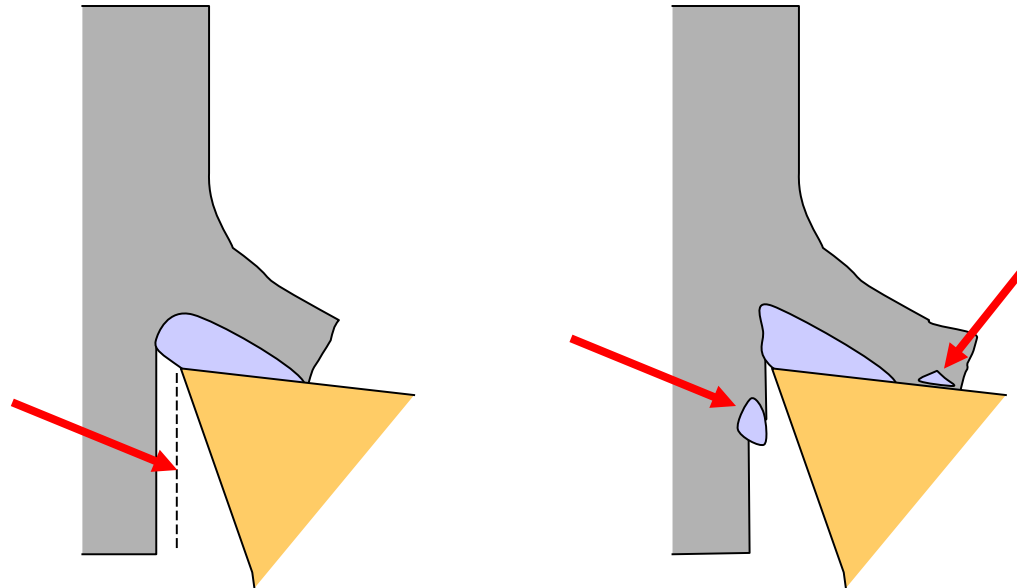
La figura seguente illustra (in modo qualitativo) la distribuzione delle tensioni normali e tangenziali e l'effetto della variazione dell'angolo di spoglia superiore.



Tagliente di riporto

Il fenomeno del tagliente di riporto

Come già detto, particolari condizioni di taglio (in particolare, piccoli valori dell'angolo γ) possono favorire il fenomeno dell'attrito adesivo ($m^*=1$). In determinate condizioni, man mano che il truciolo si forma, possono depositarsi strati di metallo fortemente incrudito sul petto dell'utensile, a partire dalla zona prossima al tagliente, dando origine ad una struttura che prende il nome di tagliente di riporto (BUE: *built up edge*).



Tagliente di riporto

Il fenomeno del tagliente di riporto è accentuato da:

- Basse velocità di lavorazione
- Angolo di spoglia γ basso
- Materiali con elevata tendenza all'incrudimento (acciai inossidabili, leghe di titanio, ecc.).

Gli effetti principali sono:

- ✓ Peggioramento della rugosità superficiale
- ✓ Usura accentuata dell'utensile
- ✓ Aumento dell'angolo γ , con conseguente riduzione delle forze di taglio

All'aumentare della velocità di taglio il fenomeno tende a sparire, per cui la finitura superficiale tende a migliorare ed i fenomeni di usura dell'utensile legati a questo fenomeno a diminuire. A velocità elevate il fenomeno si trasforma nella già descritta zona di scorrimento secondario.

Aspetti termici

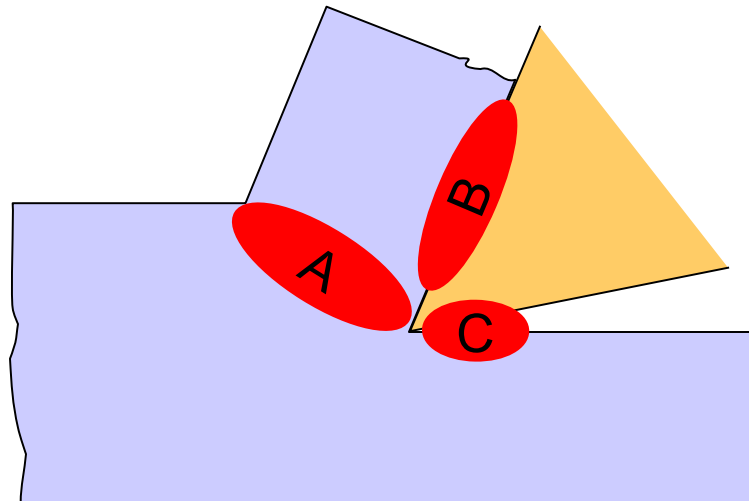
Aspetti termici del taglio

Lo sviluppo di calore durante il taglio avviene principalmente per:

Energia introdotta mediante il lavoro di deformazione plastica (circa il 98% si trasforma in calore) → zona A.

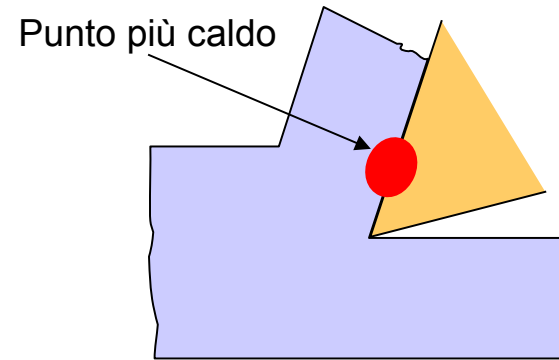
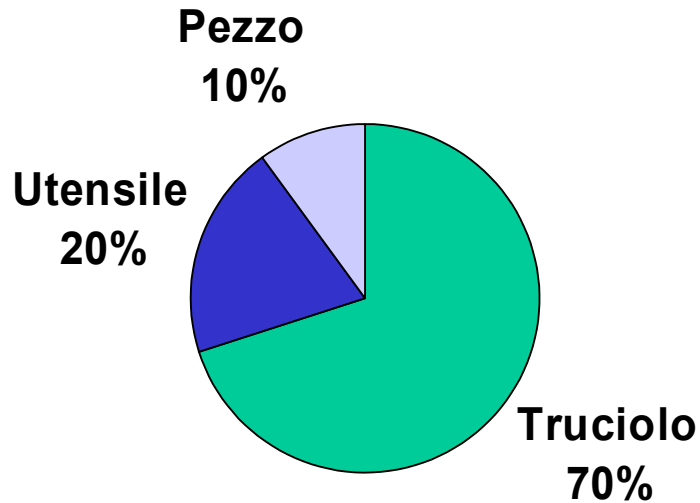
Sviluppo di calore a causa dei fenomeni di attrito e di deformazione secondaria sul petto dell'utensile → zona B .

Sviluppo di calore a causa dei fenomeni di attrito sul fianco → zona C.



Aspetti termici

Il bilancio termico può essere stimato indicativamente nel modo seguente:



Si osservi che:

- ✓ Il flusso del truciolo consente l'asportazione del calore per convezione.
- ✓ La capacità termica del pezzo in lavorazione è di solito relativamente elevata rispetto a quella di truciolo ed utensile.
- ✓ L'asportazione di calore dall'utensile può avvenire, se la lavorazione viene condotta a secco solo per conduzione.

Fluidi lubrorefrigeranti

Fluidi lubrorefrigeranti

L'uso di fluidi lubrorefrigeranti permette di conseguire i seguenti benefici:

- ✓ Lubrificazione della zona di contatto fianco-pezzo, con conseguente riduzione dello sviluppo di calore e miglioramento della finitura superficiale.
- ✓ Raffreddamento dell'utensile per convezione, con conseguente riduzione dei fenomeni di usura dello stesso.
- ✓ Asportazione dei trucioli prodotti, in particolari tipi di lavorazioni (foratura, rettifica, ecc.).

Vi sono, per contro, alcuni svantaggi, tra i quali:

- Costo dei fluidi lubrorefrigeranti e dei sistemi di adduzione.
- Effetti fisiologici sugli operatori.
- Effetti chimico-fisici su alcuni materiali (es.: ossidazione, ecc.).
- Necessità di eseguire l'asportazione dei residui dai pezzi lavorati.
- Costi di smaltimento dei fluidi esausti.

Fluidi lubrorefrigeranti

La scelta dei fluidi lubrorefrigeranti è un elemento fondamentale nell'ottimizzazione dei processi produttivi mediante asportazione di truciolo. Ad esempio:

- ✓ L'utilizzo di fluidi adeguati permette di aumentare la vita degli utensili e quindi di ridurre le spese per gli inserti, la sostituzione degli stessi ed il *presetting* degli utensili.
- ✓ L'uso di fluidi quali oli evaporanti permette di conseguire i suddetti vantaggi ed inoltre quello di evitare la necessità di dover lavare i pezzi prodotti.

In generale un fluido lubrorefrigerante deve possedere le seguenti caratteristiche:

- ▶ Bassa tensione di vapore.
- ▶ Bagnabilità nei confronti di materiale in lavorazione ed utensile.
- ▶ Alta capacità termica.
- ▶ Alta resistenza alla decomposizione.
- ▶ Alto potere lubrificante, bassa tossicità (uso e smaltimento).
- ▶ Antibatterico / antialga

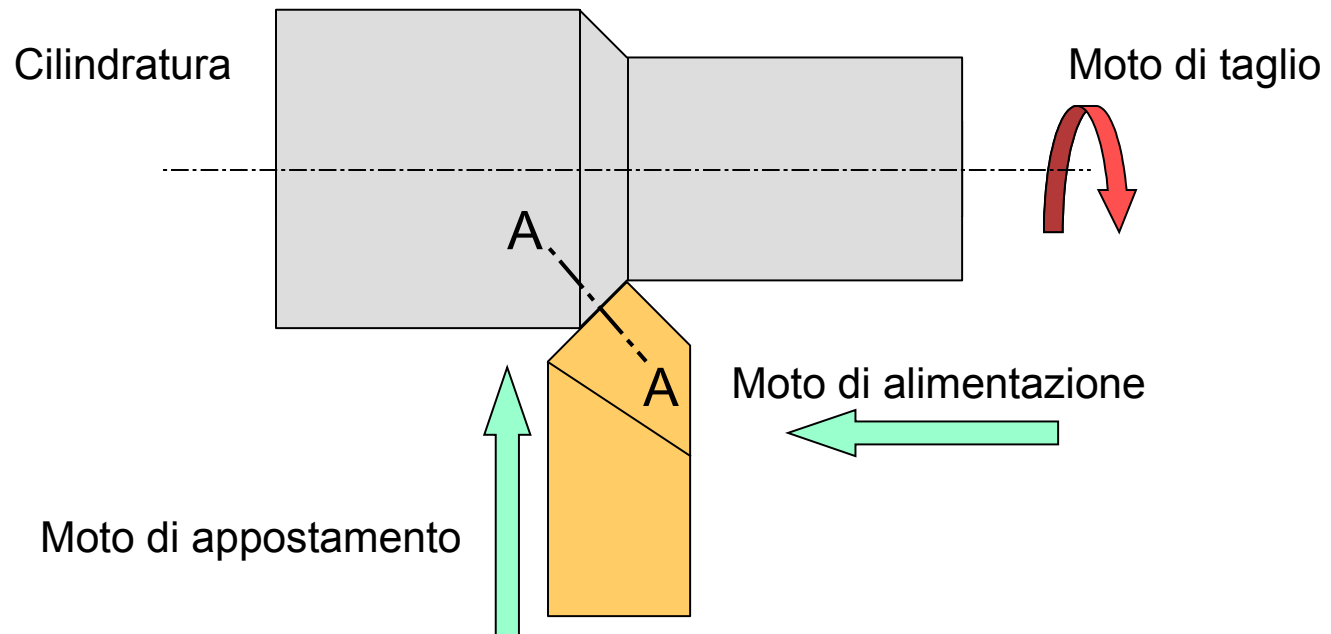
Taglio obliquo

Taglio obliquo

La gran parte delle lavorazioni meccaniche per asportazione di truciolo avviene in condizioni di taglio obliquo, cioè con il tagliente dell'utensile non perpendicolare alla velocità di taglio.

In alcuni casi, inoltre, i taglienti attivi possono essere più di uno.

Ad esempio:



Taglio obliquo

I moti illustrati vengono misurati mediante i **parametri di taglio**:

Moto di taglio → Velocità di taglio (v , [m/min] o [m/s])

Moto di alimentazione → Avanzamento (a , [mm/giro])

Moto di appostamento → Profondità di passata (p , [mm])

I taglienti dell'utensile sono due (**principale** e **secondario**), collegati da un raccordo circolare avente un certo raggio.

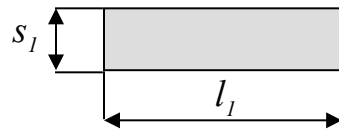
Il moto complessivo dello spigolo di taglio rispetto al pezzo è elicoidale, ed è dato dalla composizione del moto di taglio e di quello di avanzamento. La geometria del profilo ottenuto sulla superficie lavorata è di tipo elicoidale e dipende dalla maggiore o minore partecipazione del raccordo e del tagliente secondario al processo di taglio.

Il legame col taglio ortogonale può essere ritrovato analizzando le varie sezioni A-A, tenendo presente però che le condizioni di taglio variano da sezione a sezione.

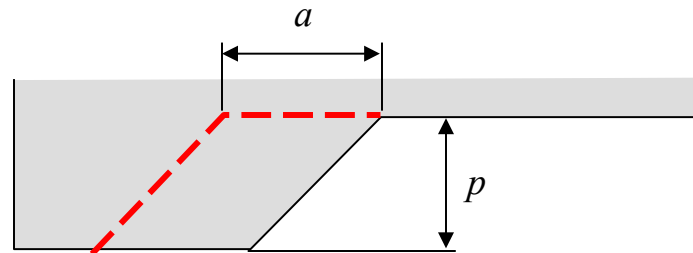
Taglio obliquo

Sezione del truciolo

Sezione reale (misurata): quella posseduta dal truciolo dopo il distacco dal pezzo in lavorazione. Lo spessore è s_l e la larghezza effettiva è l_l . A volte il truciolo può presentare asimmetrie o variazioni di spessore a causa dei processi di formazione.



Sezione teorica: $S = a \cdot p$



Sezione equivalente: detta l_e la lunghezza di tagliente in presa:

$$S_e = s_e \cdot l_e \quad s_e = \frac{S}{l_e}$$

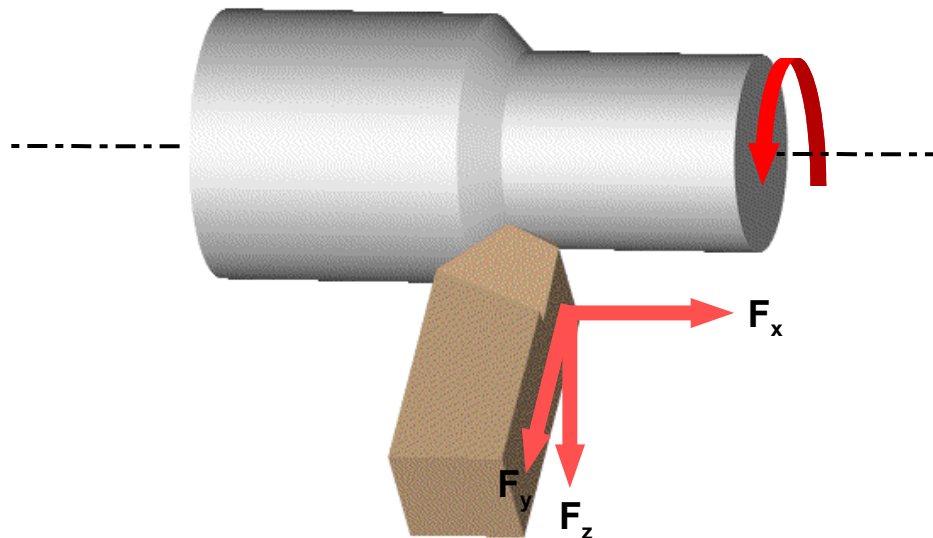
Taglio obliquo

Forze di taglio

La forza di taglio può essere suddivisa nelle seguenti componenti:

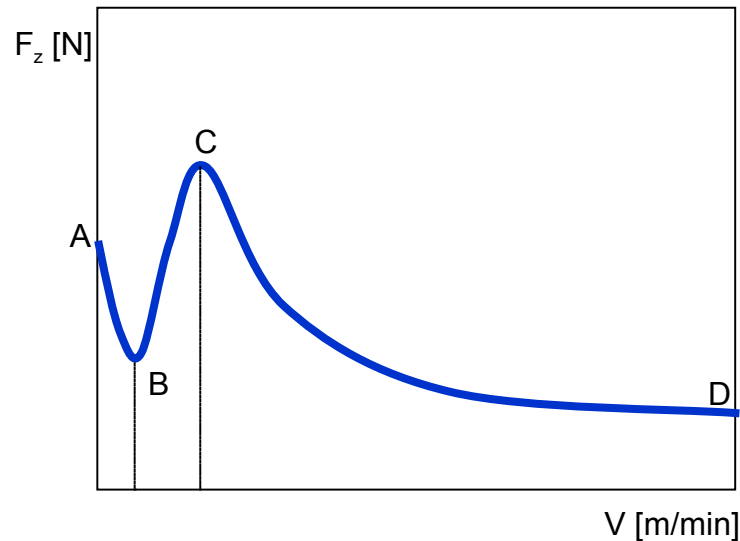
- ✓ Forza principale di taglio F_z
- ✓ Forza di repulsione F_y
- ✓ Resistenza all'avanzamento F_x

Il valore di tali componenti dipende dal materiale lavorato, dalla geometria dell'utensile e dai parametri di taglio.



Taglio obliquo

L'andamento caratteristico della forza di taglio F_z in funzione della velocità di taglio è riportato nella figura seguente:



AB: formazione del tagliente di riporto ($\gamma \uparrow$, $F_z \downarrow$).

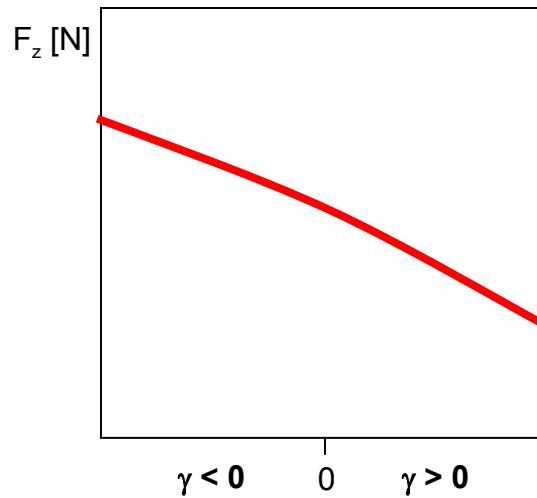
BC: la forza di taglio aumenta all'aumentare della velocità (prevale l'incrudimento).

CD: la forza di taglio diminuisce a causa della maggiore deformabilità del materiale ad alta temperatura.

D→: la forza di taglio è praticamente indipendente dalla velocità.

Taglio obliquo

L'andamento caratteristico della forza di taglio F_z in funzione dell'angolo di spoglia superiore è riportato nella figura seguente:



Si osservi che la forza di taglio diminuisce all'aumentare di γ , per cui, a parità di potenza disponibile al mandrino ed a parità di velocità di taglio, ad un aumento dell'angolo di spoglia superiore corrisponde la possibilità di asportare sezioni di truciolo maggiori.

Utensili

Utensili per il taglio dei metalli

Materiali per utensili

Le caratteristiche principali richieste ad un materiale per utensili sono:

- Elevata durezza a freddo.
- Elevata durezza e resistenza al creep alla temperatura di regime.
- Elevata tenacità (taglio interrotto, ecc.)
- Alta resistenza all'usura (inerzia chimica nei confronti del materiale lavorato e dell'ossigeno, stabilità chimica, ecc.).
- Elevata conducibilità termica.
- Basso coefficiente d'attrito nei confronti del materiale lavorato.
- Basso costo.

Le caratteristiche indicate sono spesso antitetiche, per cui la scelta di un materiale per utensili viene effettuata in modo tale da ottenere i migliori compromessi.

Utensili

I materiali per utensili più utilizzati sono:

- ▶ Acciai fortemente legati (HSS: High Speed Steel).
- ▶ Leghe fuse (o stelliti).
- ▶ Carburi metallici sinterizzati.
- ▶ Materiali ceramici.
- ▶ Cermets.
- ▶ Diamante.

Per alcune lavorazioni di finitura, a bassa velocità di taglio (filettature, alesature) e per la costruzione di trince e stampi vengono utilizzati anche acciai al carbonio ed acciai debolmente legati. Nonostante la temprabilità sia favorita da tenori di carbonio sino all'1.5%, questi materiali mantengono le loro caratteristiche sino a temperature di lavoro non superiori a 250°-300° C.

Utensili

Acciai fortemente legati

In questi materiali la composizione prevede una quantità di elementi in lega (W, Cr, V, Co) superiore al 5%, con medi tenori di carbonio (0.6% ÷ 0.9%).

Lo scopo degli elementi in lega è quello di:

- ✓ Promuovere la precipitazione di carburi stabili alle temperature di lavoro, finemente dispersi.
- ✓ Ridurre la velocità critica di tempra, in modo da rendere il materiale autotemprante in aria.
- ✓ Affinare la grana del materiale, promuovendo la nucleazione durante il raffreddamento.
- ✓ Migliorare la resistenza all'ossidazione del materiale.
- ✓ Rendere il materiale autolubrificante (S).

La durezza non è di molto superiore a quella degli acciai al carbonio (intorno ai 65 HRC), ma essa si mantiene praticamente inalterata sino a 500° ÷ 600° C.

Utensili

Leghe fuse (stelliti)

Questi materiali sono ottenuti dalla fusione di Co, Cr e W, più piccole percentuali di Mo, Fe, C.

La capacità di mantenere elevata la durezza ad alta temperatura è molto elevata, ma è parimenti elevata la difficoltà nella produzione (date le alte temperature di fusione) e nella lavorazione di questi materiali. In effetti i semilavorati possono essere lavorati solo alla mola.

Inoltre sono materiali estremamente fragili e quindi inadeguati alla costruzione di utensili integrali.

In genere vengono impiegati sotto forma di riporti, applicati con tecniche quali la deposizione mediante torcia al plasma, sulle parti soggette ad usura, oppure sotto forma di placchette, prodotte talvolta per sinterizzazione-diffusione a partire dalle polveri metalliche dei componenti puri, le quali vengono in seguito brasate agli steli degli utensili.

L'accoppiamento dei due materiali consente di ottenere un ottimo compromesso fra tenacità e resistenza all'usura e durezza.

Utensili

Carburi metallici sinterizzati

Il primo materiale sinterizzato a base di carburi metallici è stato il Widia (=Wie Diamant, Krupp, anni '20).

Tali materiali sono quelli oggi più largamente utilizzati per la produzione di utensili di elevate prestazioni. Essi sono costituiti da due fasi:

- Fase ceramica dura discontinua, costituita da carburi metallici (WC, TiC, TaC, NbC).
- Matrice metallica di Co, in percentuale sino al 10% in volume, la quale agisce da legante nei confronti delle particelle non metalliche.

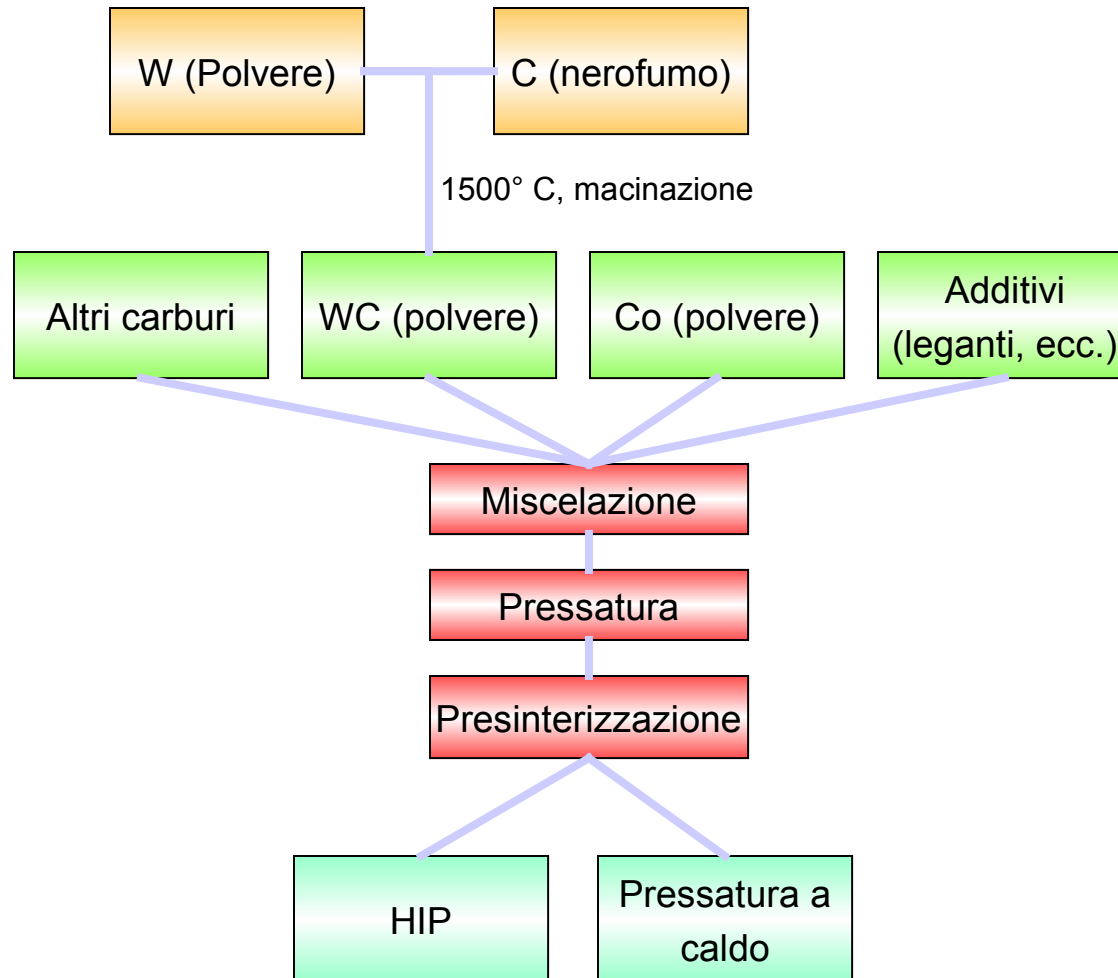
Il legante metallico si rende necessario a causa dell'elevata refrattarietà dei carburi utilizzati.

Le durezze ottenibili si aggirano tra i 74 ed i 78 HRC e vengono mantenute sino ed oltre i 1000° C.

Data la scarsa tenacità ed il costo relativamente elevato, si preferisce normalmente impiegare tali materiali sotto forma di inserti, fissati meccanicamente o brasati agli steli degli utensili.

Utensili

Il processo produttivo (semplificato) è schematizzato nella figura seguente:



Utensili

Materiali ceramici

Sono materiali particolarmente interessanti per la loro durezza, per la capacità di mantenerla anche ad alte temperature, per la loro elevata resistenza al creep, alla craterizzazione, alla formazione del labbro di usura ed inoltre per la loro refrattarietà.

Il problema principale è la loro fragilità, maggiore rispetto a quella dei carburi sinterizzati.

Vengono utilizzati esclusivamente sotto forma di placchette, la cui geometria deve essere tale da evitare l'insorgere di sforzi di trazione. Per questo motivo l'angolo di spoglia superiore è spesso negativo. E' necessario inoltre adottare tutti gli accorgimenti necessari per evitare l'insorgere di vibrazione durante la lavorazione: ciò richiede un sistema utensile-pezzo-macchina utensile estremamente stabile, rigido e di grande potenza. Per lo stesso motivo, ed anche per sfruttare la maggior plasticità del materiale alle alte temperature, è consigliabile lavorare a velocità di taglio molto elevate (900-1000 m/min).

Tipici materiali utilizzati sono l' Al_2O_3 ed il BN; gli inserti vengono preparati per sinterizzazione.

Utensili

Cermets

Un cermet è un materiale composito costituito da una materiale ceramico (cer) ed uno metallico (met). Un cermet è progettato per avere le proprietà ottimali di entrambe le classi di materiali: resistenza e durezza a temperature elevate e tenacità. Il metallo è usato come legante per un ossido, un boruro, o un carburo. I leganti metallici più utilizzati sono nichel, molibdeno e cobalto (di solito il metallo costituisce meno del 20 % del volume).

I Cermets vengono utilizzati al posto del Widia per le loro proprietà di resistenza all'usura e alla corrosione. Il nitrato di titanio (TiN), il carbonitrato titanio (TiCN), il carburo di titanio (TiC) ed altri materiali simili possono essere brasati come il carburo di tungsteno.

Utensili

Diamante

Il diamante sintetico viene largamente impiegato come polvere di diversa granulometria per la preparazione di mole ed utensili per lucidatura o per produrre placchette sinterizzate (10^{10} Pa, 2400° C, atmosfera inerte), con le quali sono state raggiunte velocità di lavorazione intorno ai 5000 m/min.

Vengono prodotti inoltre utensili di piccole dimensioni a partire da diamanti sintetici o naturali monocristallini, sfruttando, per la formazione del tagliente, la presenza di piani di sfaldatura naturali.

Le elevate prestazioni sono dovute all'estrema durezza ed alla precisione strutturale del tagliente. Il materiale è tuttavia fragile, per cui è necessario osservare le stesse prescrizioni di stabilità, assenza di vibrazioni e velocità di taglio viste nel caso dei materiali ceramici.

Il materiale può risentire inoltre di fenomeni di ossidazione, per cui è necessario l'uso di un adeguato sistema lubrorefrigerante.

Utensili

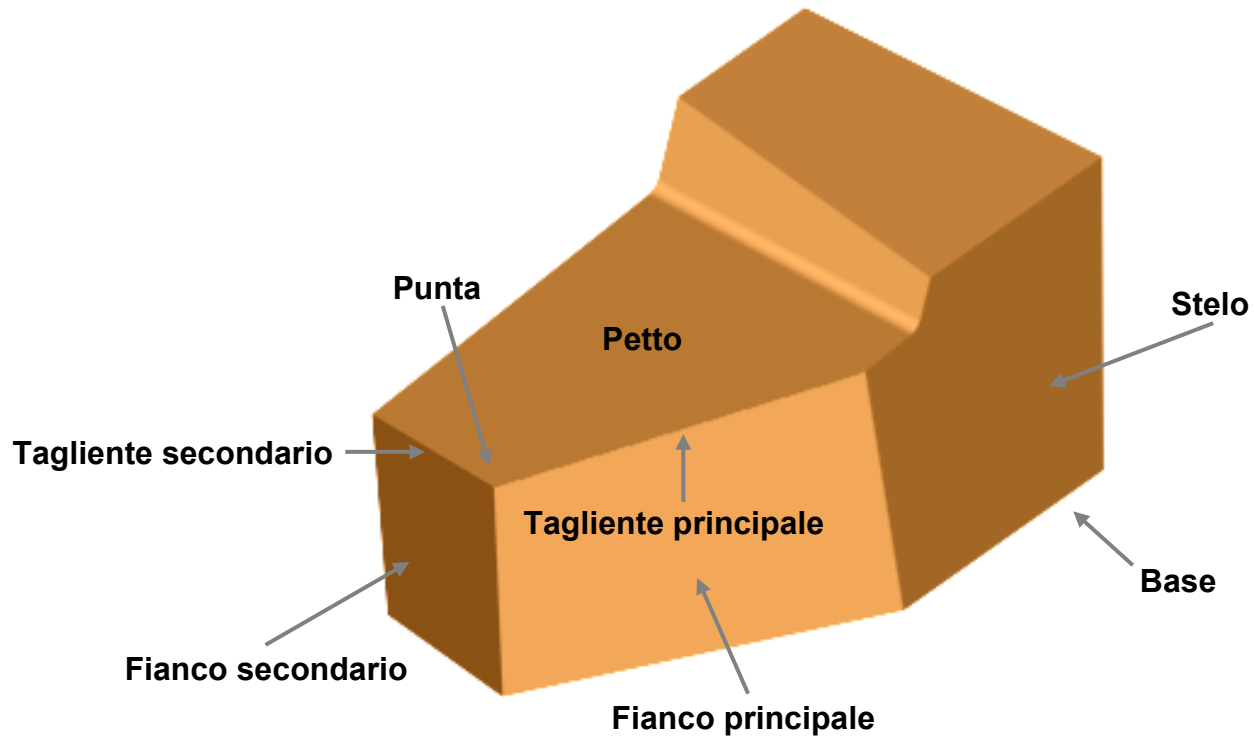
Nomenclatura dell'utensile a punta singola

La nomenclatura sarà riferita, per concretezza, agli utensili utilizzati nell'operazione di tornitura.

- **Testa**: è la parte dell'utensile sulla quale si trovano i taglienti.
- **Stelo**: la parte rimanente dell'utensile; ha lo scopo di permettere il fissaggio alla macchina utensile (torretta portautensile).
- **Collo**: parte dello stelo a sezione ridotta (es: torniture interne).
- **Base**: faccia dello stelo che appoggia sul sistema portautensile.
- **Petto**: superficie attiva della testa sulla quale scorre il truciolo.
- **Fianco**: superficie attiva della testa adiacente al petto. Si distingue il fianco principale, prospiciente alla superficie in lavorazione, da quello secondario, prospiciente alla superficie lavorata.
- **Tagliente**: spigolo definito dall'intersezione del petto con un fianco. Si distingue un tagliente principale ed un tagliente secondario.
- **Profilo**: la linea descritta dal tagliente principale e da quello secondario.
- **Punta**: il punto di intersezione tra tagliente principale e secondario.

Utensili

Si noti inoltre che fra i due taglienti vi è sempre un raggio di raccordo, il quale caratterizza la punta dell'utensile e rende graduale la transizione fra tagliente principale e secondario.



Utensili

Alcune definizioni riguardo al pezzo da lavorare:

Superficie da lavorare: superficie del pezzo prima dell'asportazione del truciolo.

Superficie in lavorazione (o di taglio): superficie generata sul pezzo dall'azione dell'utensile, all'atto dell'asportazione del truciolo.

Superficie lavorata: superficie generata sul pezzo dall'azione dell'utensile, dopo l'asportazione del truciolo.

Angoli caratteristici

Il sistema di riferimento per gli angoli è il seguente:

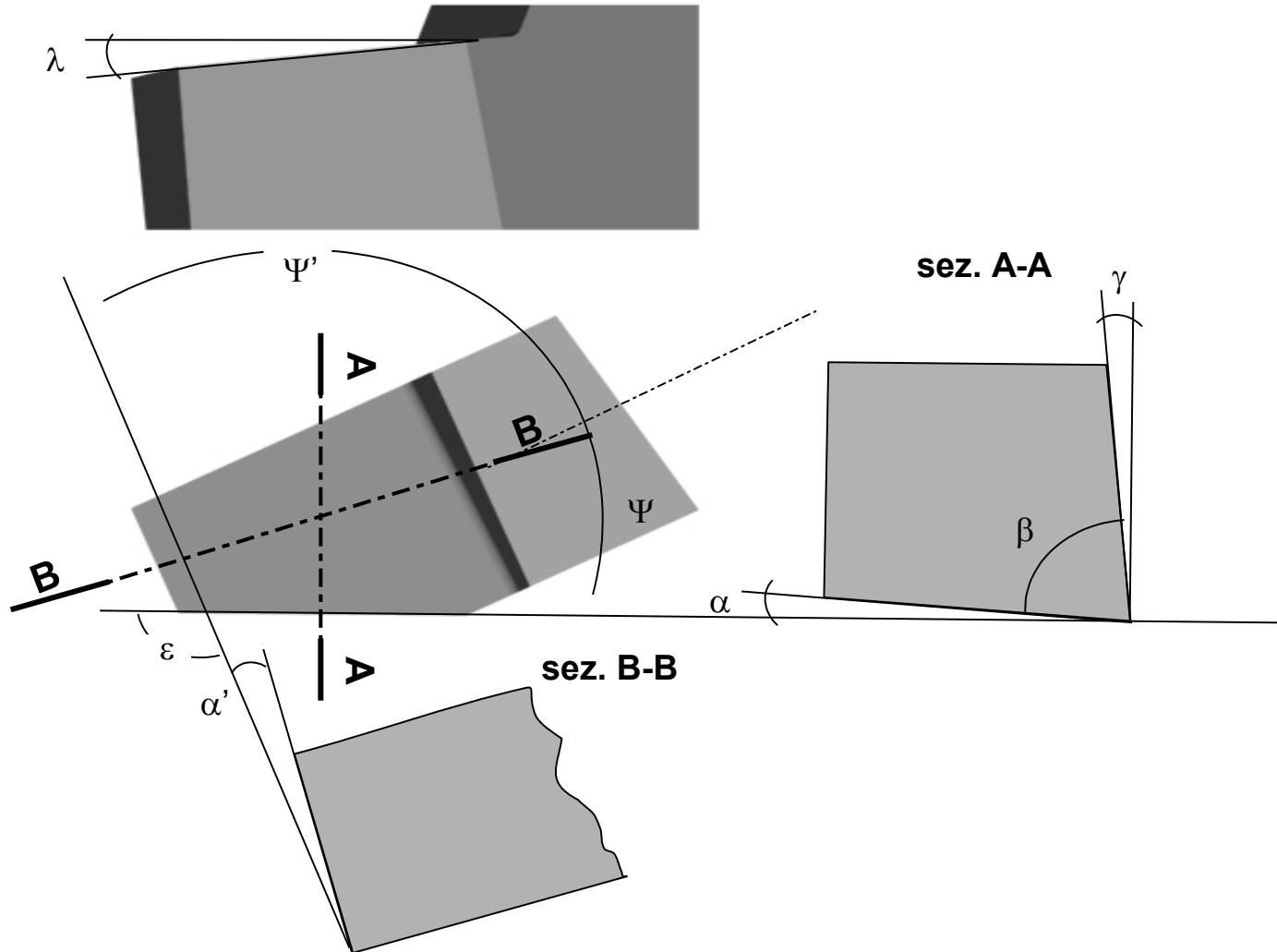
- ✓ Piano passante per la punta dell'utensile e parallelo al piano di base.
- ✓ Asse dello stelo.

Si distinguono:

- Angoli della sezione normale
 - Angoli del profilo
 - Angoli di registrazione
- } Propri dell'utensile

Utensili

Viste dell'utensile **in mano** e definizione degli angoli caratteristici:



Utensili

Angoli della sezione normale:

γ : angolo di spoglia superiore, formato dal petto con il piano di riferimento, misurato in una sezione A-A normale alla proiezione del tagliente principale sul piano di riferimento.

α : angolo di spoglia inferiore principale, formato dal fianco principale con un piano contenente il tagliente principale e normale al piano di riferimento, misurato nella sezione A-A sopra definita.

α' : angolo di spoglia inferiore secondario, formato dal fianco secondario con un piano contenente il tagliente secondario e normale al piano di riferimento, misurato in una sezione B-B normale alla proiezione del tagliente secondario sul piano di riferimento.

β : angolo di taglio, formato dal petto con il fianco principale, misurato nella sezione A-A sopra definita.

Sussiste la relazione: $\beta=90^\circ-(\alpha+\gamma)$

Utensili

Angoli del profilo:

Ψ : angolo del tagliente principale, formato dalle proiezioni del tagliente principale e dell'asse dello stelo sul piano di riferimento.

Ψ' : angolo del tagliente secondario, formato dalle proiezioni del tagliente secondario e dell'asse dello stelo sul piano di riferimento.

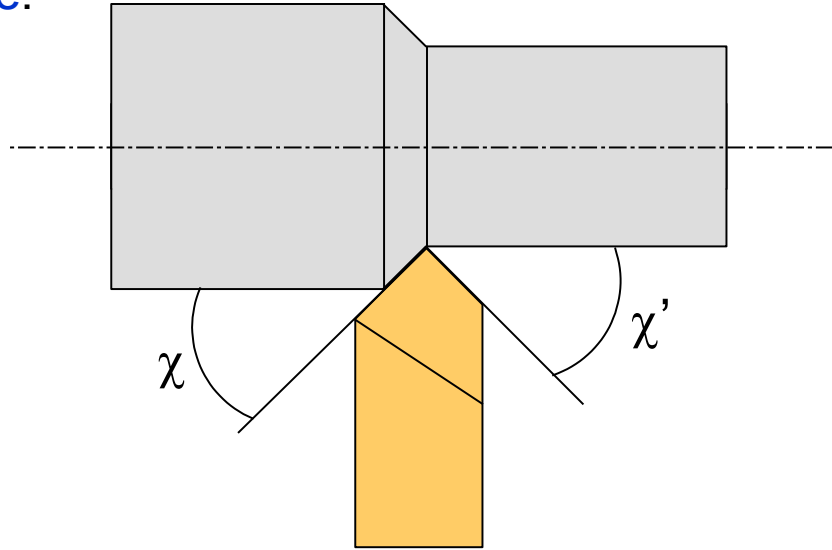
ε : angolo dei taglienti, formato dalle proiezioni del tagliente principale e secondario sul piano di riferimento.

λ : angolo di inclinazione del tagliente principale, formato dal tagliente principale con il piano di riferimento (positivo se il tagliente si trova sotto il piano di riferimento).

Sussiste la relazione: $\varepsilon = \Psi + \Psi'$

Utensili

Angoli di registrazione:



χ : Angolo di registrazione del tagliente principale, formato dalla proiezione del tagliente principale e della superficie lavorata sul piano di riferimento.

χ' : Angolo di registrazione del tagliente secondario, formato dalla proiezione del tagliente secondario e della superficie lavorata sul piano di riferimento.

Sussistono ovvie relazioni tra gli angoli χ , χ' , Ψ , Ψ' , ε .

Utensili

Dimensionamento dell'utensile: angolo α

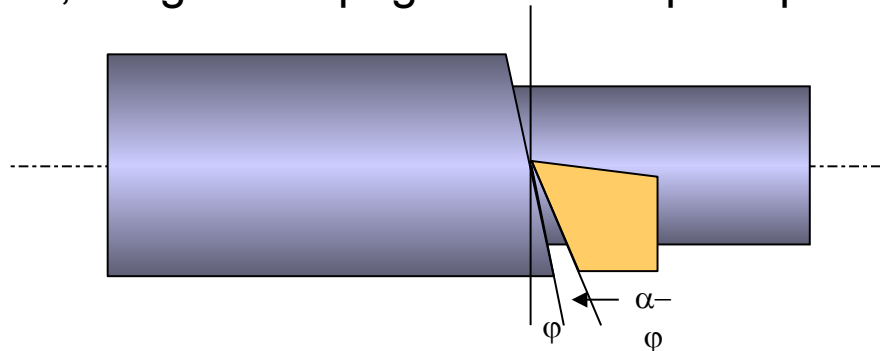
Durante una lavorazione di tornitura la punta dell'utensile percorre una traiettoria elicoidale di passo a e di diametro D pari a quello del pezzo (per essere precisi $D-2 \cdot p$) rispetto alla superficie lavorata.

L'angolo dell'elica risultante sarà:

$$\varphi = \text{atan}\left(\frac{a}{\pi \cdot (D - 2 \cdot p)}\right)$$

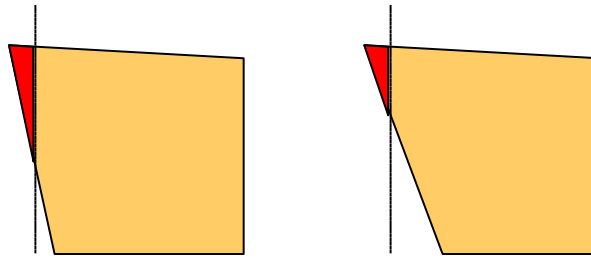
Tale angolo va sottratto all'angolo di spoglia inferiore principale α , che assume quindi un valore effettivo pari ad $\alpha - \varphi$.

Normalmente φ è piccolo ($< 1^\circ$), ma ad esempio nelle lavorazioni di filettatura può assumere valori significativi, per cui è necessario verificare che, in ogni caso, l'angolo di spoglia inferiore principale reale sia positivo.



Utensili

Si osservi che, per contro, all'aumentare di α , la sezione resistente alla pressione di taglio diminuisce. Inoltre, essendovi un limite pratico alla dimensione accettabile del labbro di usura (funzione della finitura superficiale desiderata), la vita utile di un utensile risulta maggiore, almeno da questo punto di vista, se α è piccolo.



Nella scelta del valore corretto dell'angolo α bisogna tenere conto anche del tipo di materiale lavorato in quanto:

- La pressione specifica di taglio è funzione del materiale in lavorazione.
- Alcuni materiali hanno ritorno elastico trascurabile dopo la formazione del truciolo, in altri (generalmente quelli meno duri) tale recupero deve essere tenuto in debito conto.

Utensili

La scelta dell'angolo α va fatta anche in funzione del materiale costituente l'utensile, in quanto materiali più fragili richiedono l'uso di sezioni resistenti maggiori e quindi angoli più piccoli.

Dato che in effetti anche il tagliente secondario è impegnato nella lavorazione, analoghi ragionamenti possono essere fatti per valutare il valore ottimale dell'angolo α' (in genere i due angoli vengono assunti identici).

Nelle applicazioni normali il valore di α e α' può variare da un minimo di circa 2° (lavorazione di materiali duri con utensili fragili) ad un massimo di $12^\circ \div 14^\circ$ (lavorazione di materiali a bassa durezza con utensili in HSS).

Utensili

Dimensionamento dell'utensile: angolo γ

Tale angolo, assieme a λ , determina l'inclinazione del tagliente principale e la posizione del petto dell'utensile: ha quindi diretta influenza sui meccanismi di formazione del truciolo.

E' stato già evidenziato il fatto che tanto maggiore è l'angolo γ e tanto minore è la deformazione prodotta all'atto della formazione del truciolo e l'entità delle forze necessarie per provocarla. Inoltre, poichè all'aumentare di γ la pressione di taglio diminuisce, vi è anche una corrispondente diminuzione delle forze d'attrito nel contatto petto-truciolo.

Ciò va, evidentemente, a vantaggio della produttività in quanto:

- ✓ La velocità di taglio può essere aumentata pur mantenendo sotto controllo la temperatura dell'utensile.
- ✓ La velocità di taglio può essere aumentata a parità di potenza fornibile dalla macchina utensile.

Utensili

Resta comunque valido quanto già detto riguardo alla sezione resistente dell'utensile nei riguardi della pressione di taglio e del materiale di cui è fatto l'utensile: nel caso di utensili in materiale ceramico si adottano **angoli γ negativi**, in modo che le sollecitazioni presenti siano di sola compressione. Ciò comporta evidentemente la necessità di utilizzare macchine utensili aventi potenze disponibili al mandrino maggiori, pur tenendo in considerazione il fatto che la maggior temperatura raggiunta nella zona di taglio rende il materiale in lavorazione più facilmente deformabile.

Dimensionamento dell'utensile: angolo β

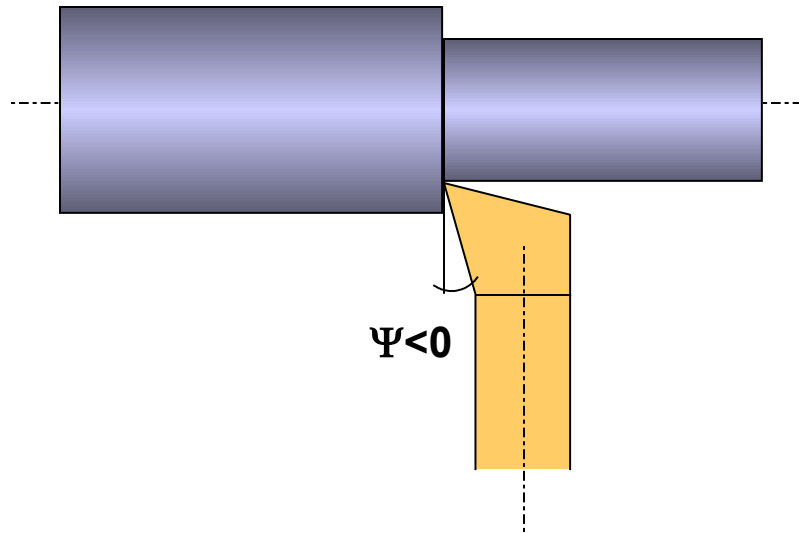
Poichè vi è una relazione diretta tra l'angolo β e gli angoli α e γ , valgono i ragionamenti già esposti.

Utensili

Dimensionamento dell'utensile: angoli Ψ e Ψ'

L'angolo Ψ influenza le componenti della forza di taglio: infatti se, ad esempio, esso è nullo, si ha $F_y=0$ (o quasi). Se invece $\Psi>0$, compare anche la componente di repulsione.

Nel caso in cui si debbano realizzare degli spallamenti, è necessario che Ψ sia ≤ 0 .



Utensili

Si osservi anche che sussiste il seguente legame tra Ψ , a , s , p ed l .

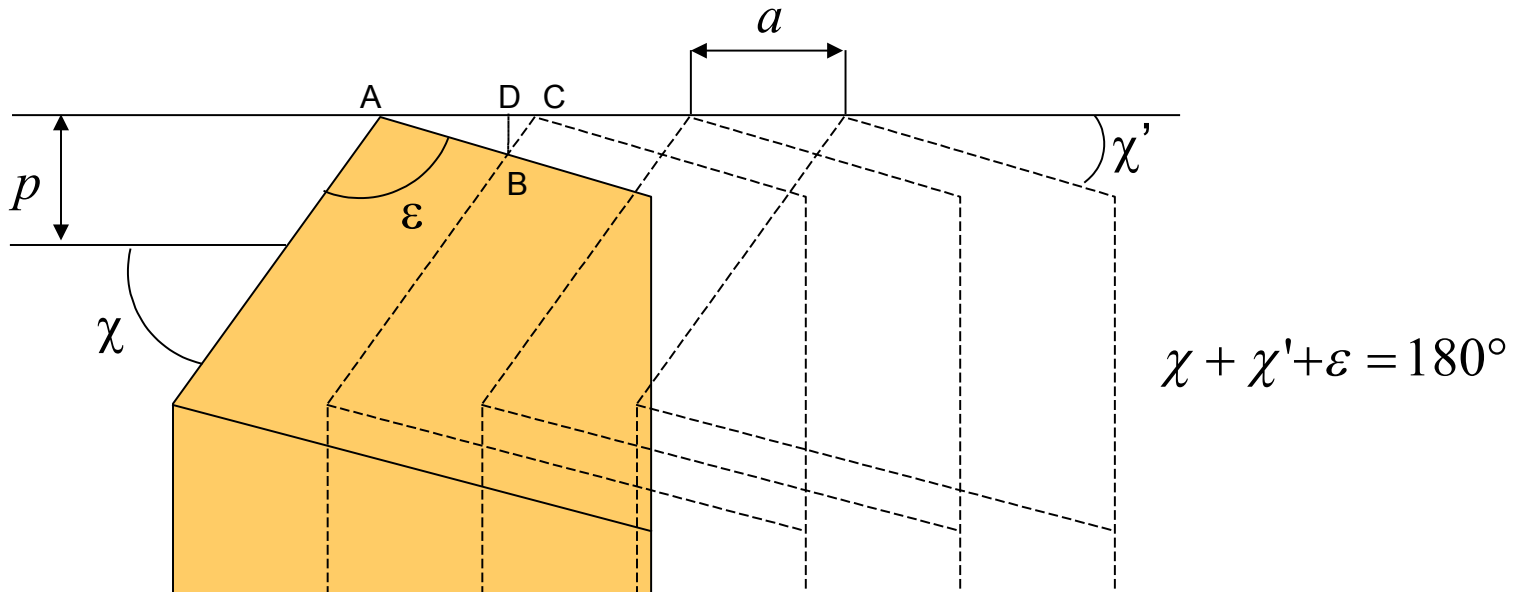
$$s = a \cdot \cos(\Psi) \quad l = \frac{p}{\cos(\Psi)}$$

- Per $\Psi=0$, si ha $s=a$.
- Aumentando Ψ lo spessore del truciolo diminuisce ed aumenta la sua larghezza.
- Poichè la durata del tagliente è influenzata principalmente dallo spessore del truciolo, aumentando Ψ si possono ottenere durate maggiori o, a parità di vita utile, si può lavorare a maggiori velocità di taglio.
- E' bene comunque evitare spessori di truciolo troppo ridotti perchè potrebbero insorgere fenomeni di rifiuto, con conseguente strisciamento.
- Un aumento dell'angolo Ψ comporta un aumento della forza di taglio e di quella di repulsione.
- Forze di repulsione elevate portano ad una maggiore inflessione del pezzo lavorato, con conseguente difficoltà a mantenere le tolleranze.
- Vi è anche un'influenza sulla direzione di deflusso del truciolo (vedere λ).

Utensili

Dimensionamento dell'utensile: angolo ε dei taglienti

L'angolo ε influenza la robustezza della punta dell'utensile e determina, al contempo ed insieme al profilo del tagliente le caratteristiche del solco elicoidale sulla superficie lavorata caratteristico della tornitura. Dal punto di vista pratico ciò influenza (assieme ad altri fattori) il valore di R_a ottenibile. Nel caso semplificato di utensile con raggio di raccordo nullo sulla punta:



Utensili

Dalla figura si può dedurre che:

$$AD \cdot \operatorname{tg}(\chi') = BD \Rightarrow AD = BD \cdot \operatorname{cotg}(\chi')$$

$$DC \cdot \operatorname{tg}(\chi) = BD \Rightarrow DC = BD \cdot \operatorname{cotg}(\chi)$$

Sommando membro a membro si ha:

$$AD + DC = DB \cdot (\operatorname{cotg}(\chi') + \operatorname{cotg}(\chi))$$

$$a = R_t^* \cdot (\operatorname{cotg}(\chi') + \operatorname{cotg}(\chi))$$

Infine, dunque, risulta:

$$R_t^* = \frac{a}{(\operatorname{cotg}(\chi') + \operatorname{cotg}(\chi))}$$

L'asterisco indica che i valori di rugosità espressi sono **teorici**.

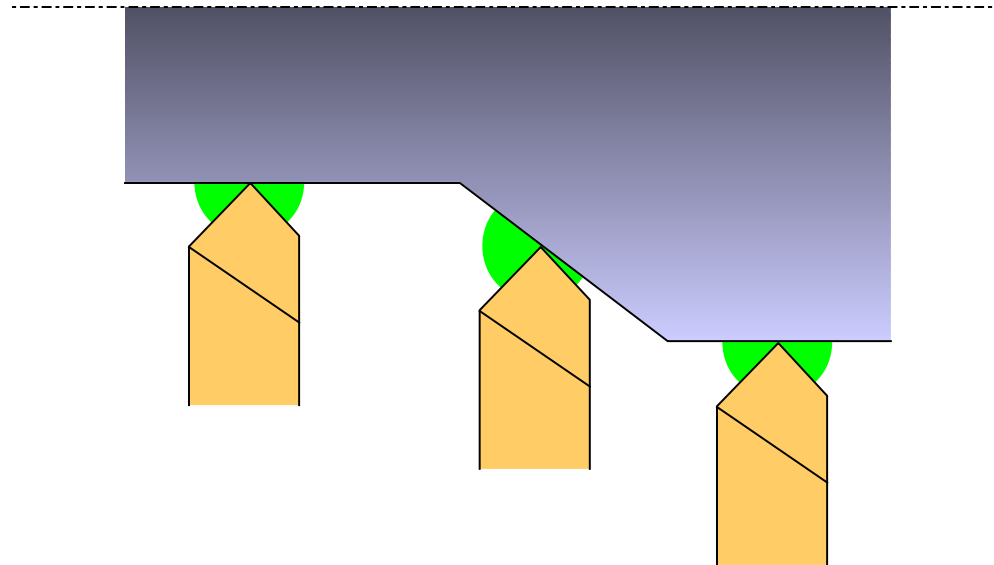
Analoghe espressioni possono essere ricavate per R_a e nel caso di utensili aventi raggio di raccordo della punta non nullo.

Utensili

Dimensionamento dell'utensile: angolo χ e χ' di registrazione

Come già visto, il valore di tali angoli ha influenza diretta sulla rugosità teorica della superficie lavorata.

Si osservi che gli angoli di registrazione possono variare, nel corso di una lavorazione, in relazione alla geometria del pezzo:



Utensili

Controllo del truciolo

Se il truciolo che si produce durante le operazioni di taglio è continuo, possono insorgere i seguenti inconvenienti:

- Danneggiamento della superficie lavorata e del tagliente dell'utensile.
- Danneggiamento della torretta portautensile o del pezzo in lavorazione per deformazione permanente o rottura.
- Difficoltà di evacuazione dalla macchina utensile.
- Pericolo per l'operatore.
- Difficoltà nella lubrorefrigerazione.

Il problema è particolarmente sentito quando la lavorazione avviene ad alta velocità, quindi, in pratica, quando si utilizzano utensili in carburi sinterizzati.

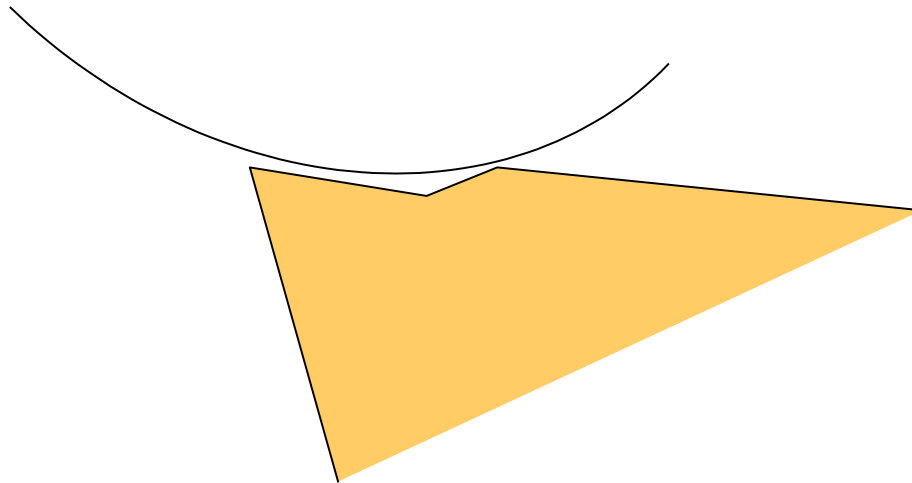
La scelta di angoli opportuni per il tagliente può consentire la scelta dell'angolo di deflusso del truciolo, ma per ottenere trucioli segmentati è necessario fare uso di dispositivi adatti detti **rompitruciolo**.

Utensili

Il principio di funzionamento si basa sull'indurre una curvatura del truciolo maggiore di quella che si avrebbe in uno svolgimento naturale, in modo tale da indurre la rottura del materiale (il quale è fortemente incrudito).

Questo effetto può essere ottenuto mediante:

- ✓ Rompitruciolo integrale, ricavato sul petto dell'utensile sottoforma di una piccola fossetta.
- ✓ Rompitruciolo regolabile, realizzato mediante una placchetta in carburi sinterizzati di forma opportuna fissata sul petto dell'utensile con sistemi meccanici.



Utensili

Usura

L'usura di un utensile è legata generalmente alle seguenti cause:

- Abrasione da parte di particelle dure presenti nel materiale lavorato (carburi, nitruri, ecc.) o generate dal tagliente di riporto.
- Diffusione, legata all'affinità chimica tra pezzo ed utensile e favorita dalle alte temperature.
- Ossidazione.
- Adesione/frattura, meccanismo legato alla formazione del tagliente di riporto.
- Deformazione plastica, favorita dall'intensità degli sforzi generati dal processo di taglio e dalle alte temperature.
- Fatica, soprattutto nel caso di taglio interrotto.

Tali meccanismi, che spesso si combinano sinergicamente, danno origine a diverse forme di usura.

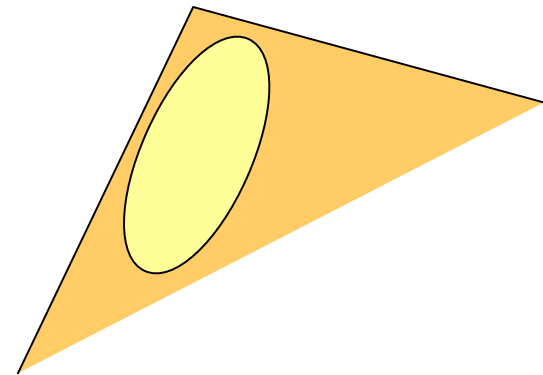
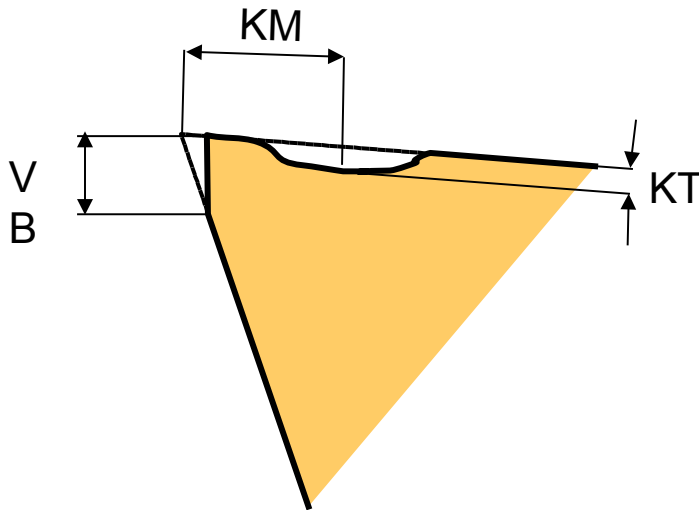
Utensili

Le forme di usura più comuni sono:

- Usura sul fianco → **labbro di usura**
- Usura sul petto → **cratere di usura**

Quantitativamente tali forme di usura possono essere valutate misurando:

- ✓ La larghezza VB del labbro di usura.
- ✓ La profondità KT del cratere di usura.
- ✓ La distanza KM del punto medio del cratere dallo spigolo originale.



Utensili

Lo studio dei fenomeni di usura consiste in:

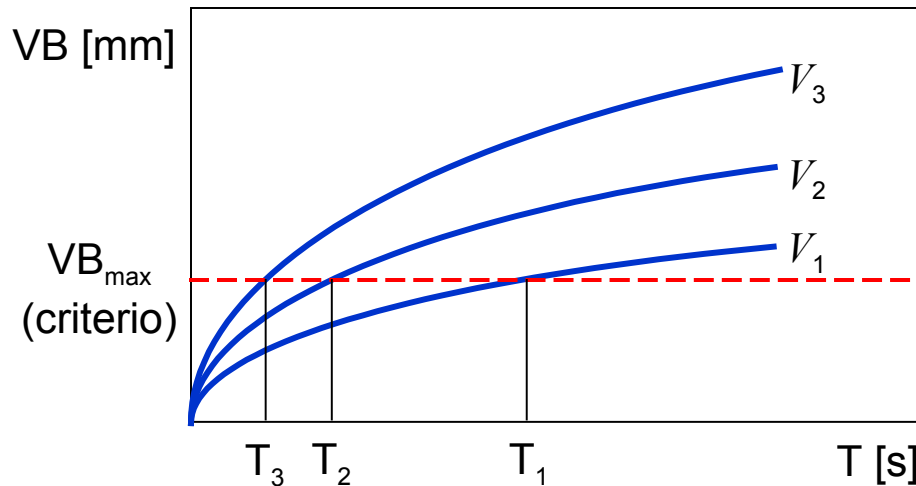
- ✓ Scelta del parametro di usura di riferimento (nel seguito verrà considerato VB).
- ✓ Scelta di un criterio di usura (ad esempio, valore massimo di VB. La scelta di tale valore è direttamente collegata alle caratteristiche di finitura superficiale che si vogliono ottenere in una data lavorazione).
- ✓ Scelta delle variabili di processo (ad esempio, velocità di taglio v e profondità di passata p).
- ✓ Uso di un modello per la generalizzazione dei risultati ottenibili mediante un set finito di prove sperimentali.

I principali problemi nell'affrontare tali studi derivano da:

- Carenze nella conoscenza teorica dei processi di usura, dovute principalmente alla complessità ed alla variabilità di tali processi.
- Mancanza di modelli teorici accurati.
- Costi e tempi delle prove sperimentali.

Utensili

L'andamento caratteristico della dimensione del labbro di usura è schematizzato nella seguente figura:



Il modello (empirico) più utilizzato è quello di Taylor:

$$v \cdot T^n = c$$

v : velocità di taglio [m/s]

T : durata dell'utensile (secondo il criterio fissato) [s]

c, n : parametri del modello (sono delle costanti)

Utensili

La relazione scritta è valida nel caso si consideri, quale unica variabile di processo, la velocità di taglio.

Si osservi che:

$$v \cdot T^n = c \quad \Leftrightarrow \quad \log(v) + n \cdot \log(T) = \log(c) \Rightarrow$$

$$\log(T) = -\frac{1}{n} \log(v) + \frac{\log(c)}{n}$$

Per cui su un piano bilogarithmico riportante $\log(v)$ sull'asse delle ascisse e $\log(T)$ su quello delle ordinate, la relazione di Taylor è rappresentata da una retta.

I parametri n e c vanno determinati per via sperimentale (con un minimo di due prove) secondo il metodo di seguito delineato:

- ✓ Si eseguono almeno due prove di durata (per questioni di affidabilità, almeno cinque) e si riportano i punti individuati sul diagramma bilogarithmico.
- ✓ Se sono state eseguite più di due prove, si esegue la regressione lineare.

Utensili

- ✓ Si determina il coefficiente angolare e l'intercetta della retta individuata.
- ✓ Si ricavano, con semplici operazioni algebriche, i valori cercati dei parametri.

NOTA BENE: Poichè la relazione di Taylor deriva da osservazioni di natura empirica, **non è possibile eseguire estrapolazioni**. Ciò deriva dal fatto che i parametri presenti non riflettono alcuna realtà fisica: l'uso di tale modello è perciò giustificato solo dal numero elevato di conferme della sua validità che sono state prodotte nel corso degli anni.

Per quanto riguarda i **limiti di validità accertati** della relazione empirica di Taylor, si osservi che essa non può essere utilizzata per velocità di taglio tali da permettere la formazione del tagliente di riporto, in quanto in tali condizioni vi è un intervallo di velocità in cui la durata dell'utensile aumenta con l'aumento della velocità di taglio!

Lavorazioni

Lavorazioni per asportazione di truciolo

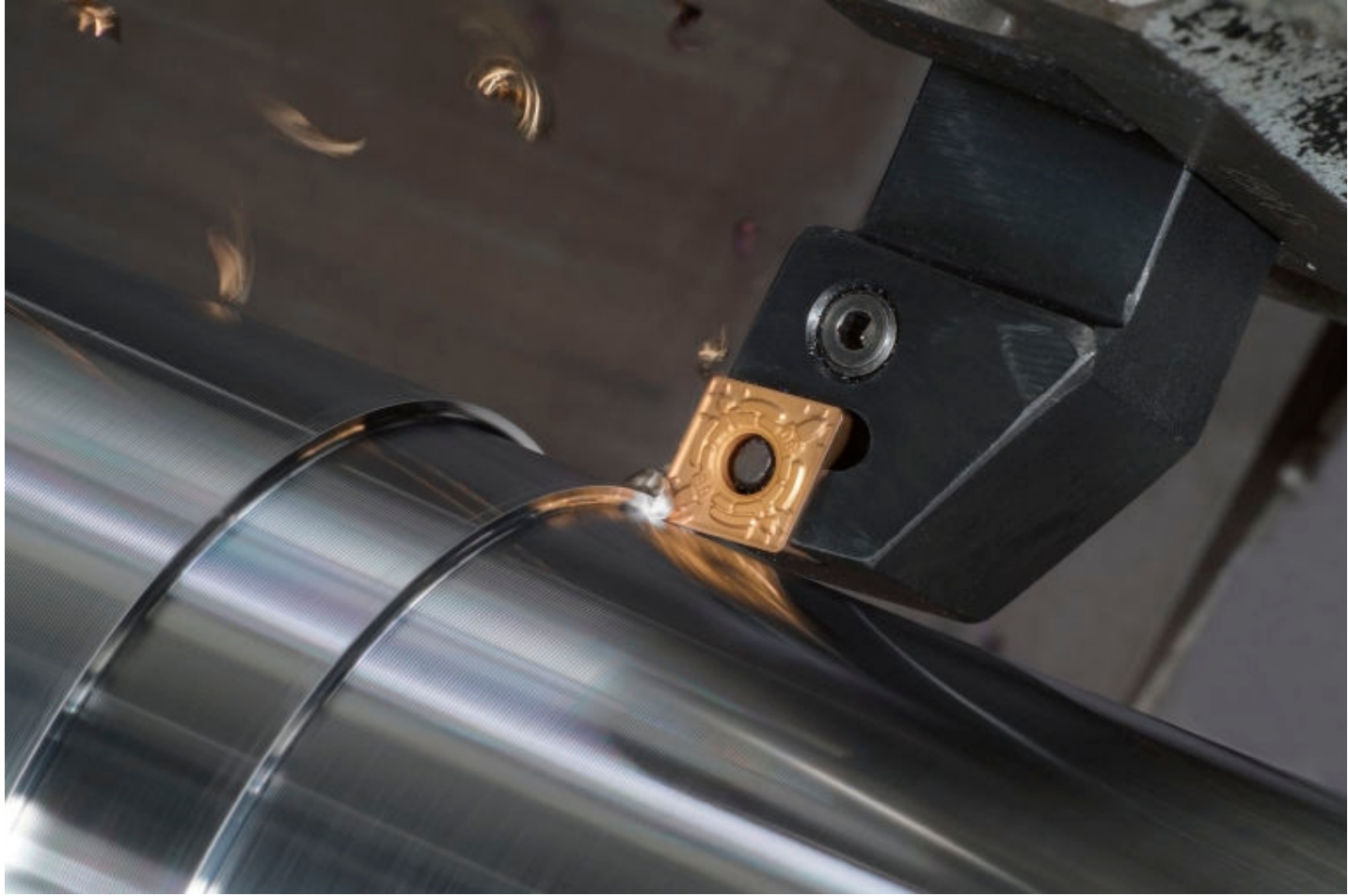
Introduzione

Le lavorazioni che verranno descritte, tra le numerose possibili, sono le seguenti:

- ✓ Tornitura
- ✓ Foratura

Lavorazioni

Tornitura



Lavorazioni

Tornitura



Lavorazioni

Tornitura

Per quanto riguarda la lavorazione di tornitura è necessario:

- Sapere descrivere i moti relativi pezzo-utensile, ed in particolare:
 - Moto di taglio.
 - Moto di alimentazione. } Moto di lavoro
 - Moto di appostamento.
- Sapere descrivere la macchina utensile impiegata, con particolare riferimento a:
 - Sistemi di fissaggio del pezzo in lavorazione.
 - Carro (slitta trasversale, slitta longitudinale, torretta portautensile).
 - Guide.
 - Sistemi di trascinamento (barra, madrevite).
 - Dispositivi di regolazione e di comando.
 - Dispositivi di azionamento (motore, trasmissione, gruppi cambio).

Lavorazioni

La tornitura si definisce in vari modi a seconda della superficie che si vuole ottenere e a seconda della posizione dell'utensile.

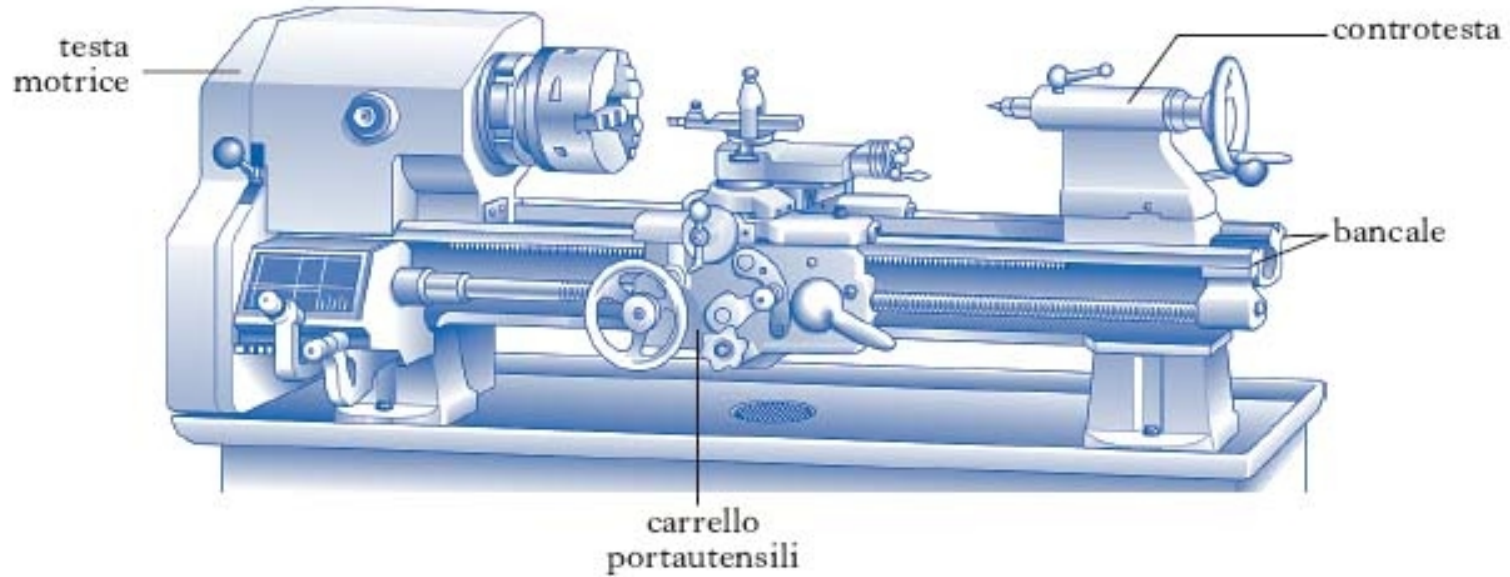
In base alla superficie che si vuole ottenere si parla di:

- Tornitura piana (o sfacciatura): superfici piane perpendicolari all'asse di rotazione del pezzo.
- Tornitura conica: superfici coniche.
- Tornitura cilindrica: superfici cilindriche coassiali con l'asse di rotazione del pezzo.
- Tornitura elicoidale: superfici elicoidali (ad esempio le filettature sul tornio).
- Tornitura di forma (o profilatura): superfici dai contorni complessi.
- Tornitura in lastra: lavorazione di lamiere.

Lavorazioni

Secondo la posizione dell'utensile la tornitura si distingue in:

- tornitura esterna: lavorazione della parte esterna del pezzo.
- tornitura interna: lavorazione della parte interna di un pezzo cavo.





Lavorazioni

Il pezzo da lavorare in tornitura può essere montato sul tornio parallelo in più modi per ricevere il moto rotatorio necessario alla lavorazione:

- a sbalzo su mandrino autocentrante: in questo caso sulla filettatura dell'albero del tornio viene montato il mandrino autocentrante. È un montaggio adatto alla tornitura di pezzi corti, oppure per operazioni di sfacciatura, troncatura, esecuzione di fori da centro o altre lavorazioni assiali.
- Tra le punte, cioè tra punta e contropunta: in questo caso sull'asse del tornio viene montata la punta, sulla filettatura dell'albero viene avvitato un disco munito di un perno eccentrico, detto menabrida, che trascina il codolo della brida (un morsetto a forma di goccia) che a sua volta trascina il pezzo in lavoro. Sulla controtesta viene inserita la contropunta, che può essere anche girevole. Per poter effettuare questo tipo di montaggio sulle due estremità del pezzo devono essere preventivamente eseguiti i fori da centro.
- Tra il mandrino autocentrante e la contropunta: è una combinazione delle due possibilità precedenti.

Lavorazioni



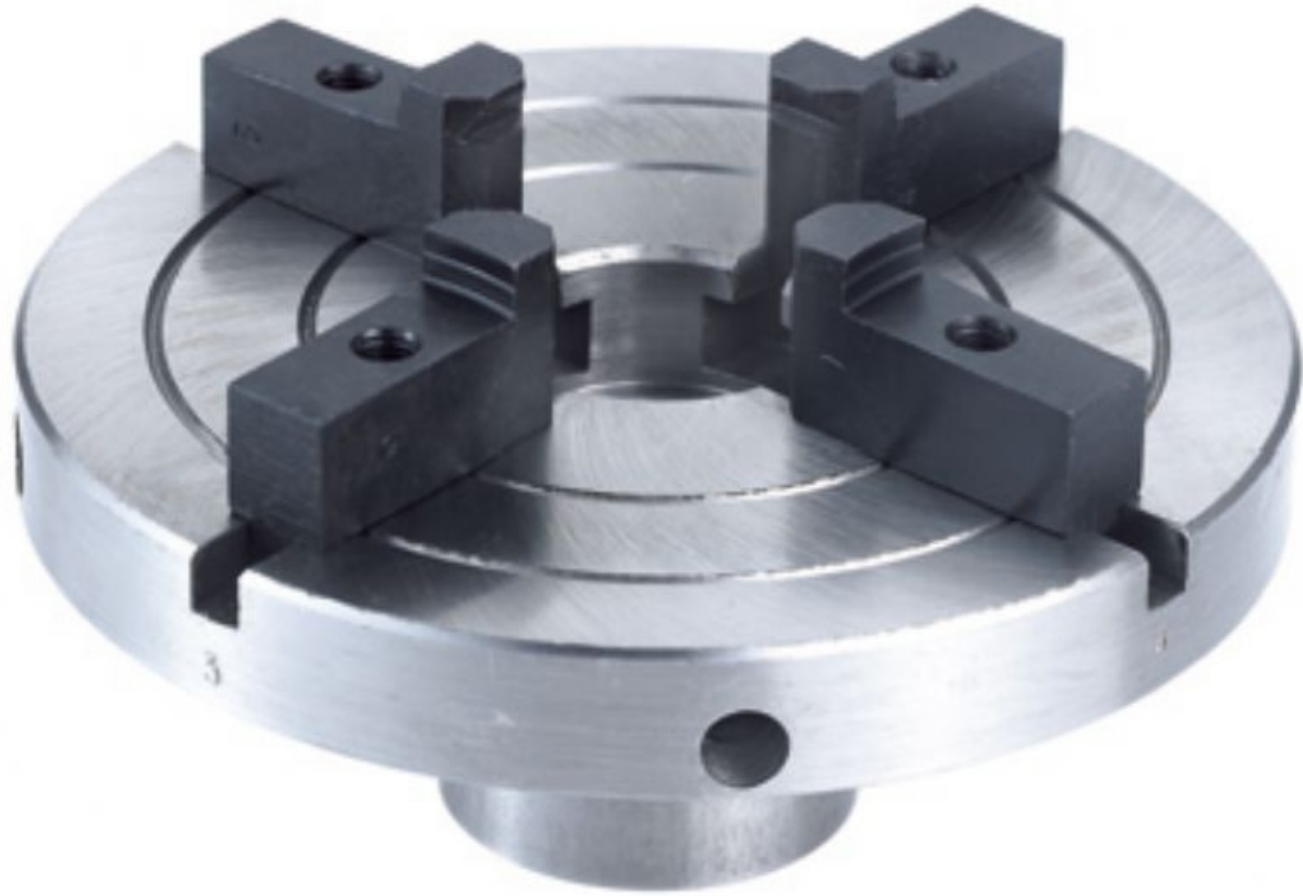
Lavorazioni



Lavorazioni



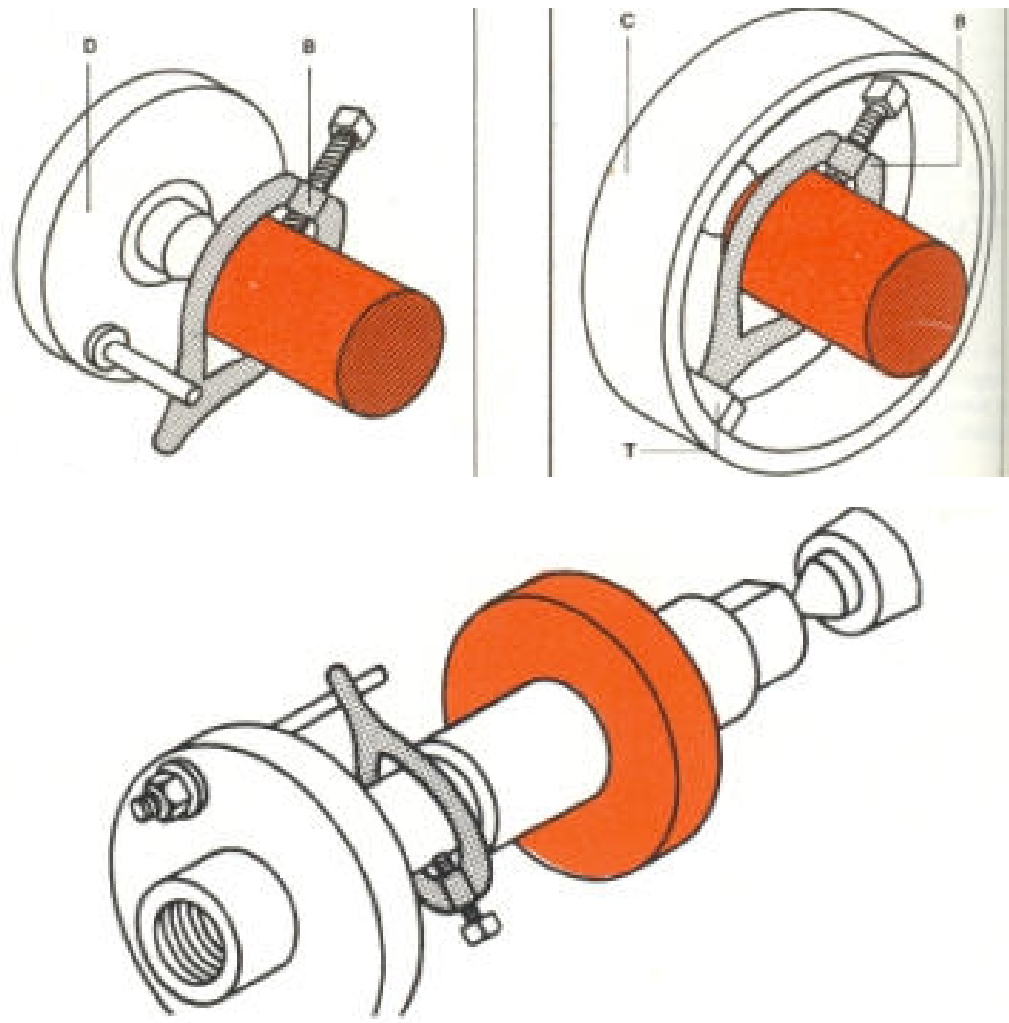
Lavorazioni



Lavorazioni



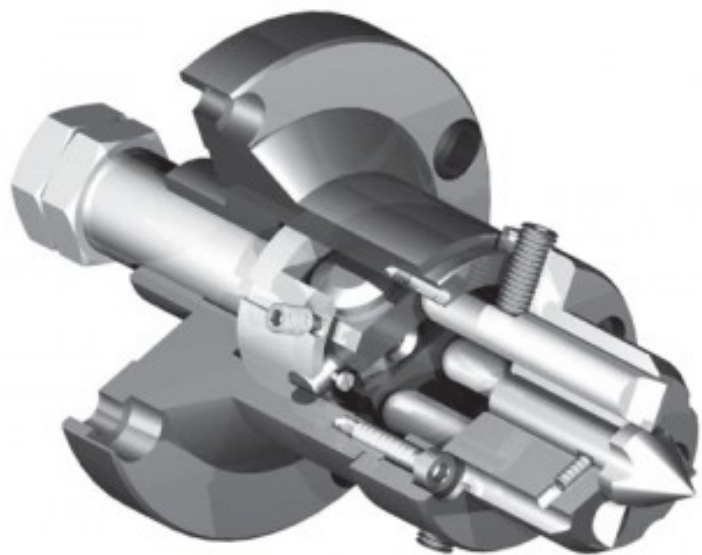
Lavorazioni



Lavorazioni

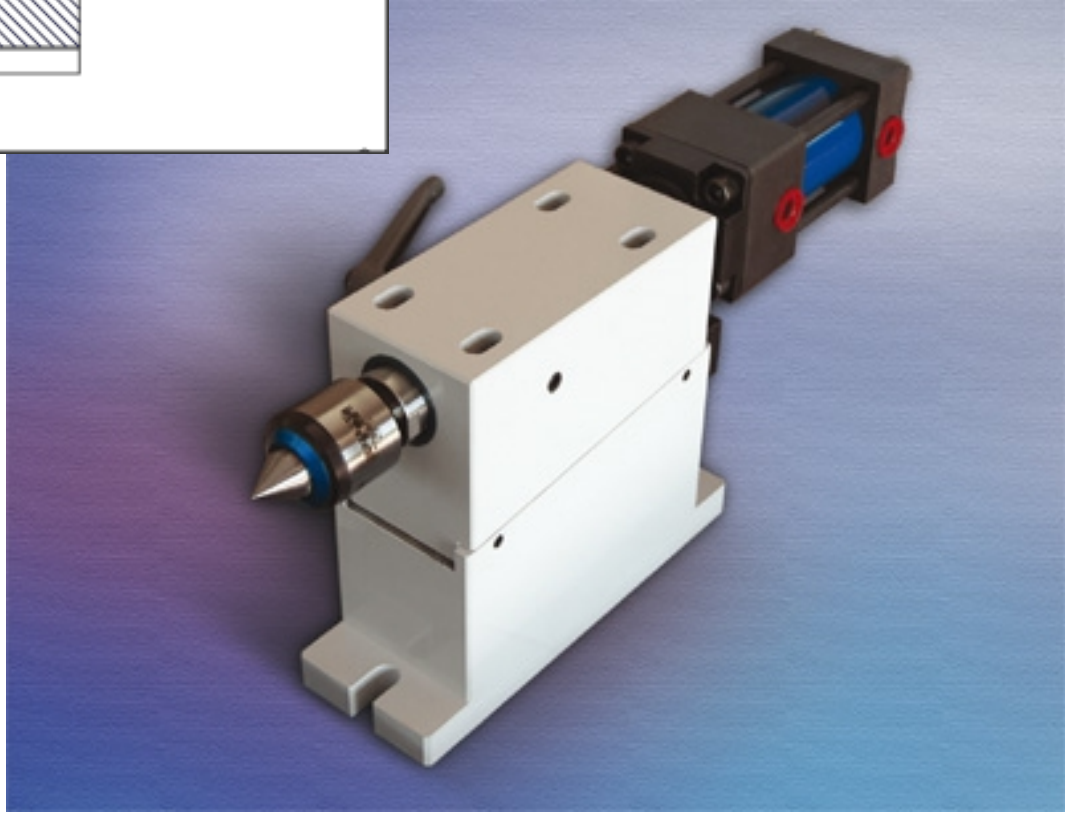
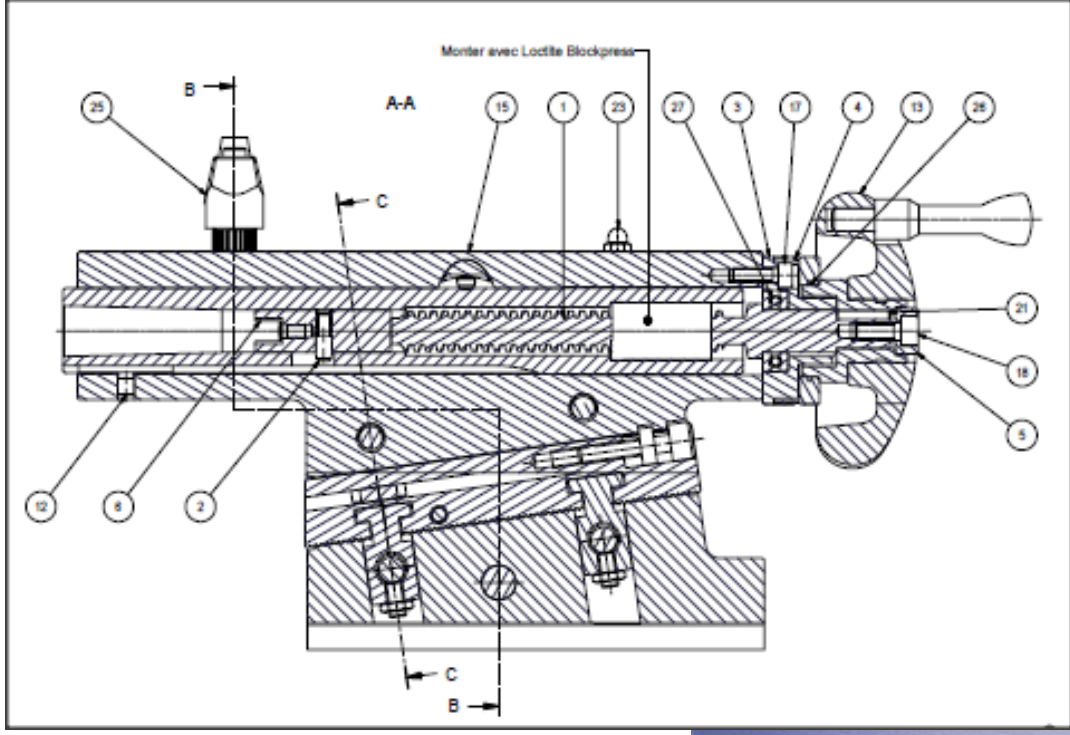


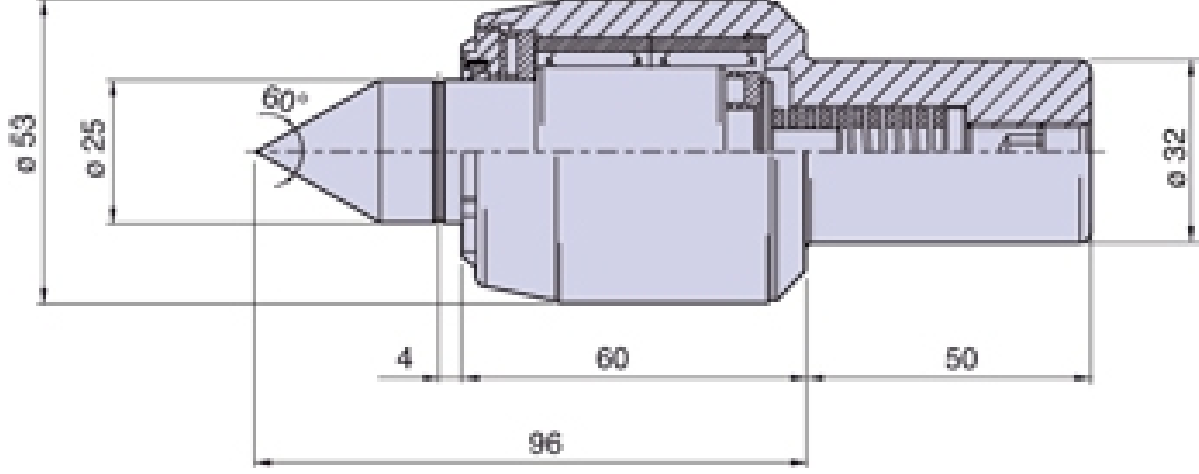
Lavorazioni



Lavorazioni





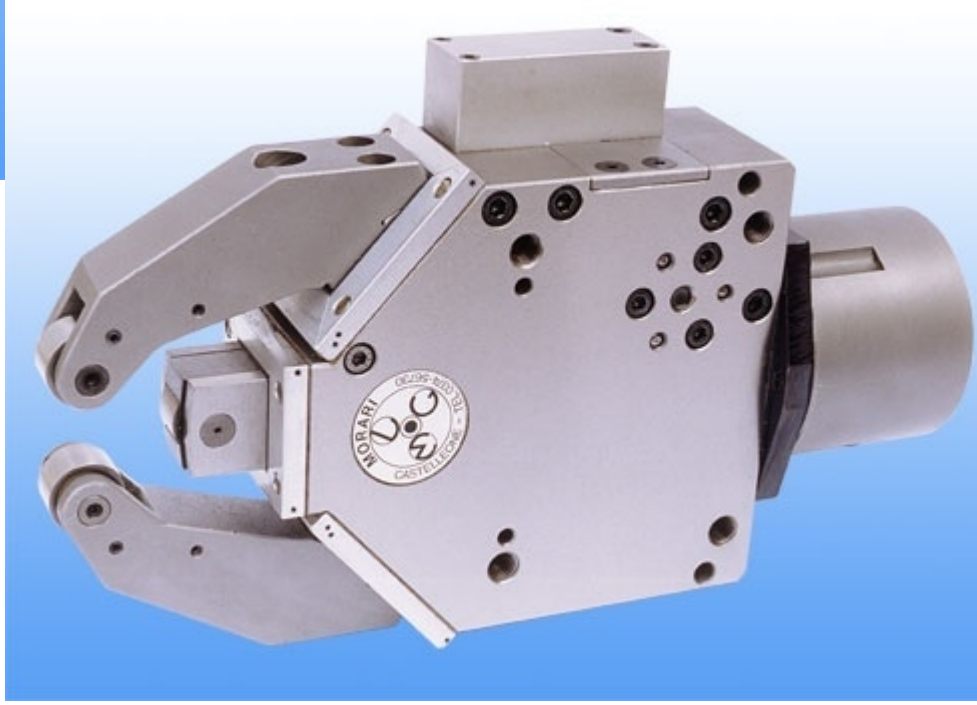
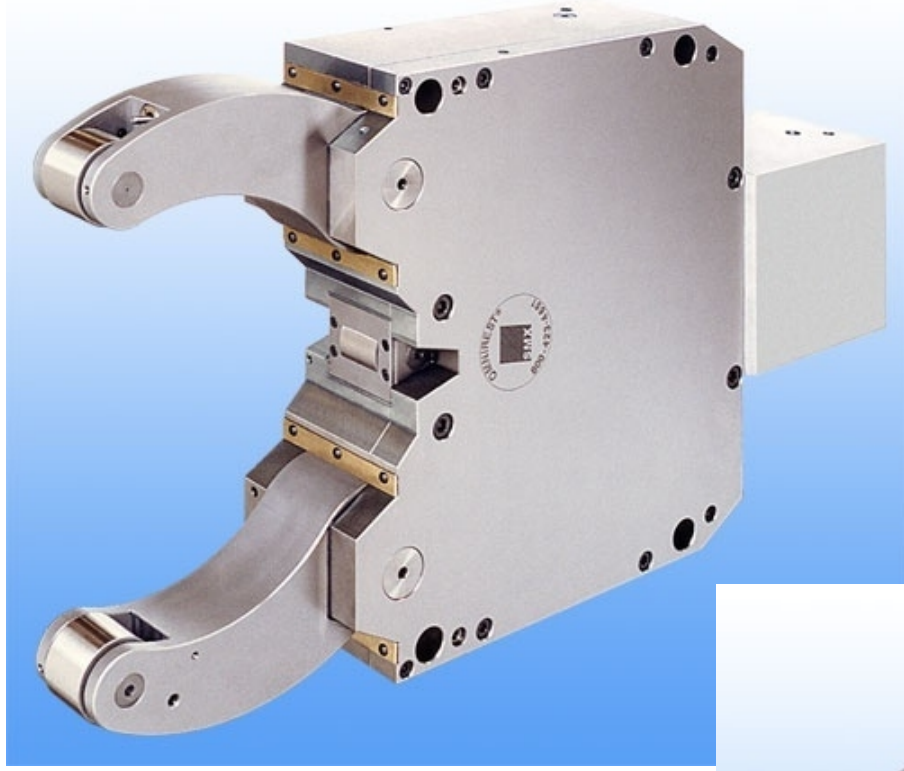












Lavorazioni

Lavorazione dei fori

In ambito meccanico è probabilmente la lavorazione più frequente, comprendendo centratura, foratura, allargatura, alesatura, svasatura, maschiatura.

Alcune di queste operazioni possono essere eseguite sul tornio, ma ordinariamente i moti caratteristici delle macchine su cui tali lavorazioni vengono effettuate sono i seguenti:

Moto di taglio: è posseduto dall'utensile, è rotatorio e continuo.

Moto di alimentazione: è rettilineo, in direzione dell'asse dell'utensile. Può essere posseduto dal pezzo o dall'utensile, a seconda della macchina impiegata.

Appostamento: serve a far coincidere l'asse dell'utensile con quello del foro che si intende realizzare e ad avvicinare l'utensile alla superficie del pezzo. Può essere posseduto dal pezzo o dall'utensile.

Nel seguito si farà riferimento alla lavorazione più comune, quella di foratura.

Lavorazioni

Foratura

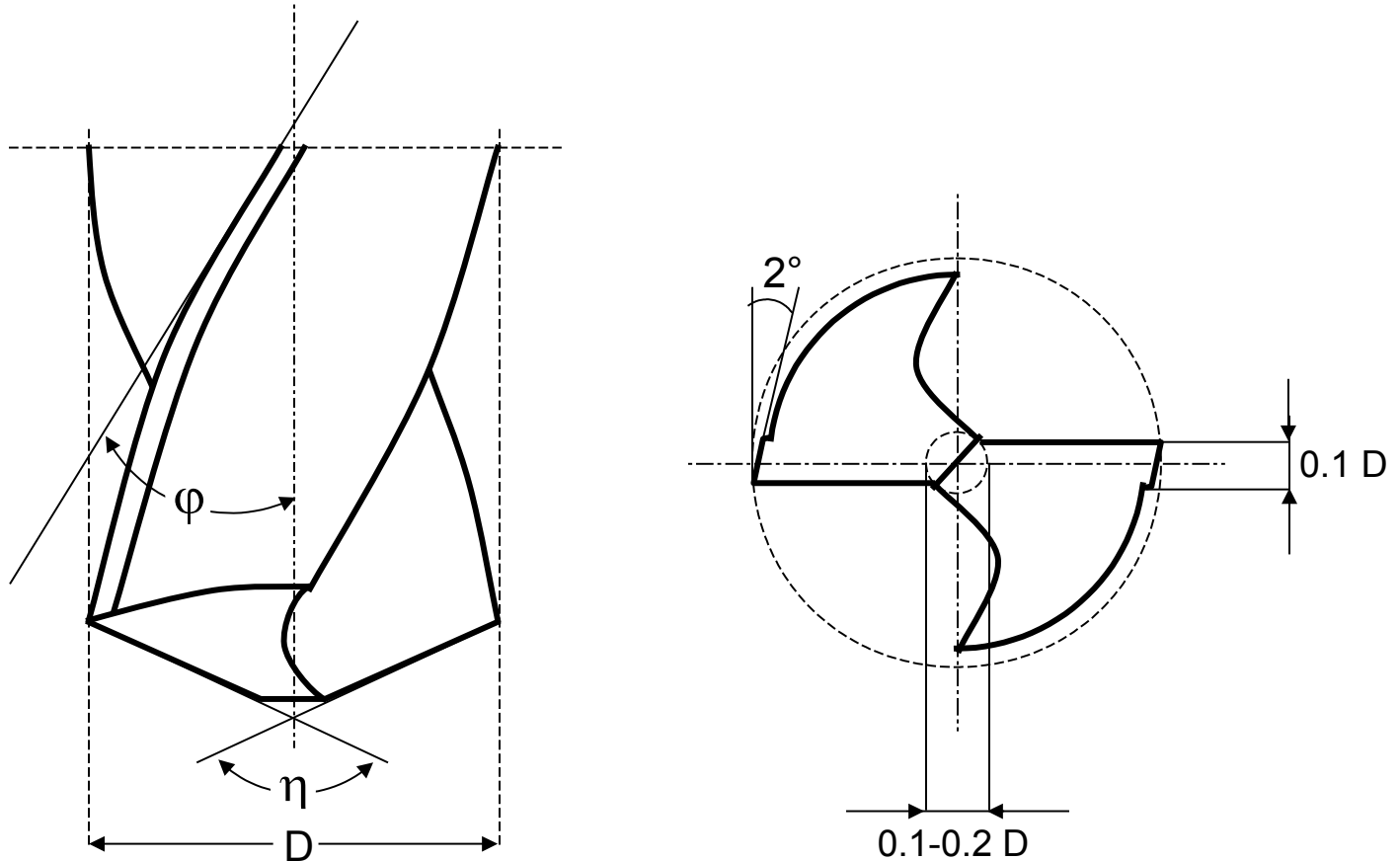
Lo scopo è ottenere un foro cilindrico. La qualità della lavorazione è bassa, tanto che normalmente la si considera un'operazione di sgrossatura.

L'utensile utilizzato più comunemente è la punta elicoidale, costituita da:

- ✓ Un codolo cilindrico o conico per il fissaggio e centraggio sul mandrino e per la trasmissione del moto e della coppia di taglio.
- ✓ Una parte cilindrica con ricavate due **scanalature elicoidali** opposte rispetto all'asse della punta con inclinazione φ . Esse hanno la funzione di permettere l'evacuazione dei trucioli e di consentire l'afflusso di fluido lubrorefrigerante.
- ✓ Due taglienti formanti un angolo η , dati dall'intersezione delle scanalature elicoidali con la superficie di estremità. Essi sono collegati da un segmento rettilineo non adatto al taglio e derivante dalla **geometria di affilatura**.
- ✓ Un tagliente secondario avente essenzialmente funzione di guida della punta nel foro e lisciatura della parete cilindrica generata, detto **quadretto**.

Lavorazioni

- ✓ Un **nocciolo centrale**, compreso tra le scanalature, di diametro normalmente compreso tra il 10% ed il 20% di quello della punta stessa (non di più per non ostacolare eccessivamente il deflusso del truciolo). Esso ha lo scopo di assicurare la resistenza torsionale della punta.



Lavorazioni

Risultano valide le seguenti relazioni:

$$\alpha = \alpha_0 - \phi$$

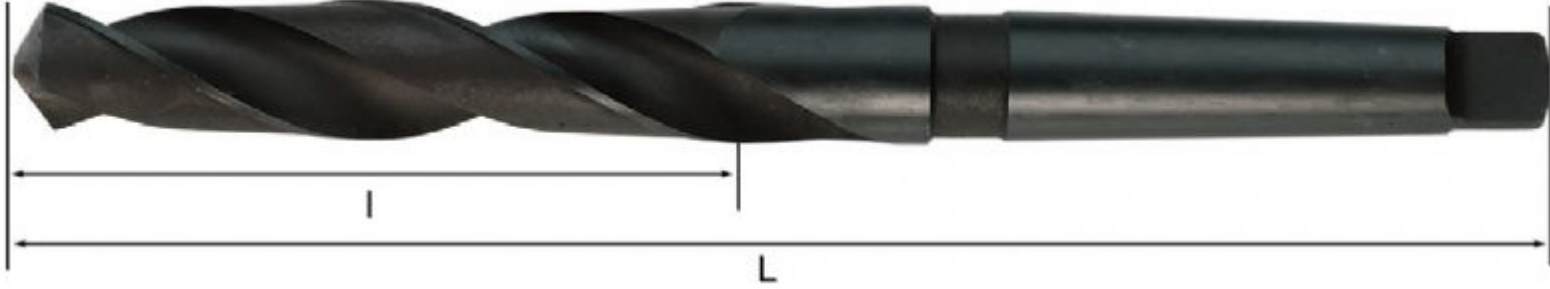
$$\gamma = \gamma_0 + \phi$$

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{a}{\pi \cdot d}\right)$$

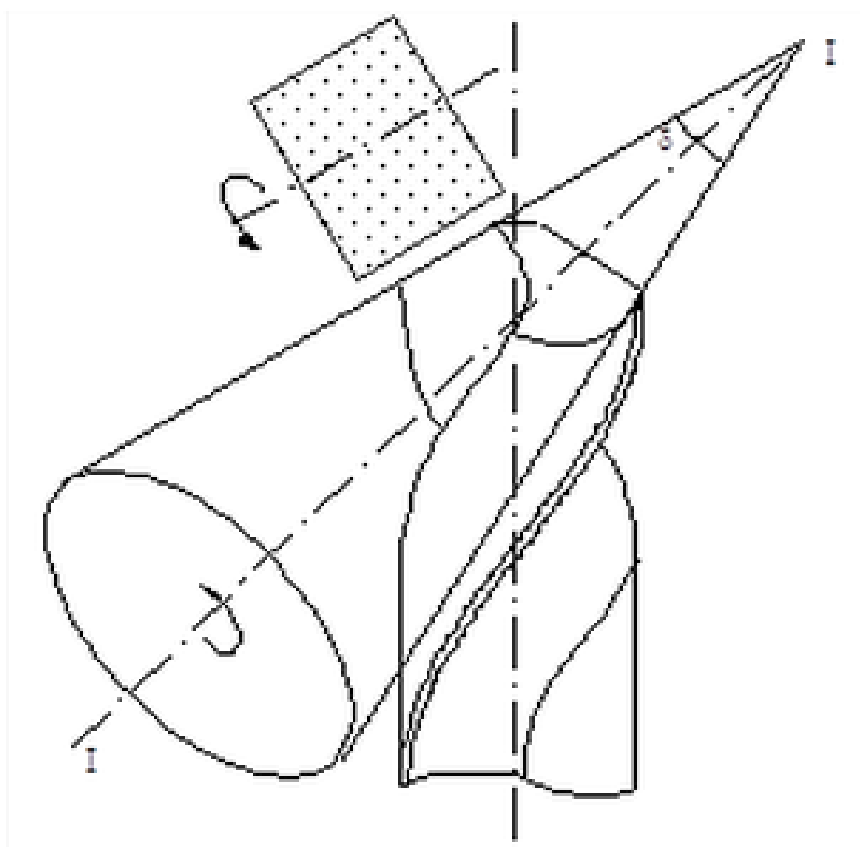
$$\gamma_0 = \text{atan}\left(\frac{\pi \cdot d}{p}\right)$$

Si osservi che, per elevati valori dell'avanzamento, l'angolo di spoglia inferiore effettivo può assumere anche valore nullo (**tallonamento**). Il problema è più accentuato per valori di d piccoli, per cui la preparazione punta viene eseguita in modo tale che l'angolo di spoglia inferiore apparente aumenti andando dalla periferia al centro della punta (e viceversa per l'angolo di spoglia superiore): ciò si ottiene affilando le due faccette secondo due superfici coniche.

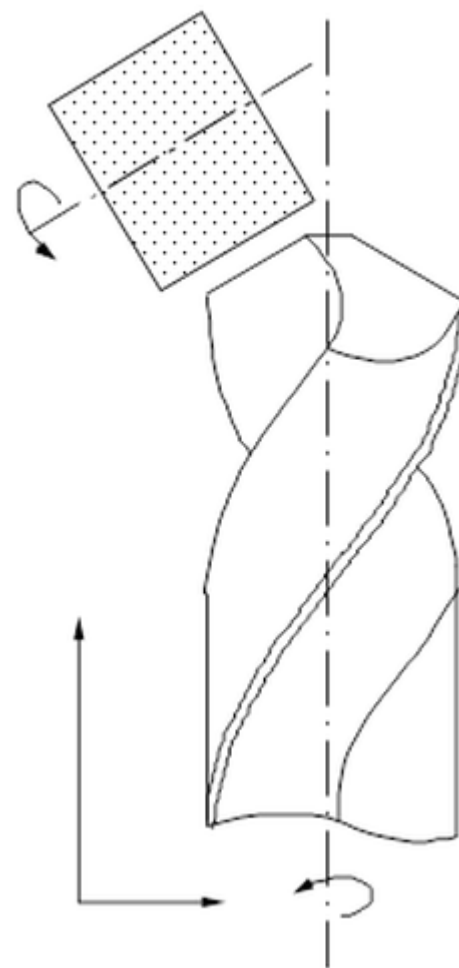
Lavorazioni



Lavorazioni

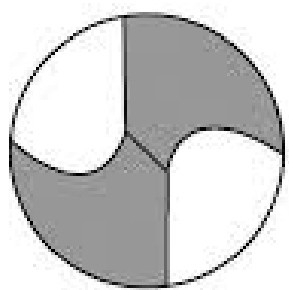
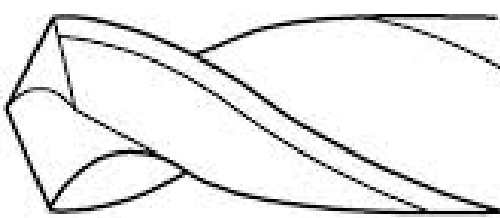


Affilatura conica

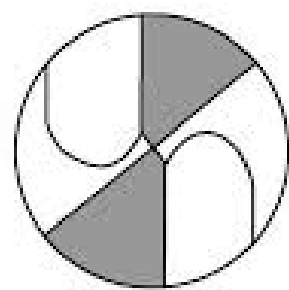


Affilatura ad elica

Lavorazioni



Standard



Split point

Lavorazioni



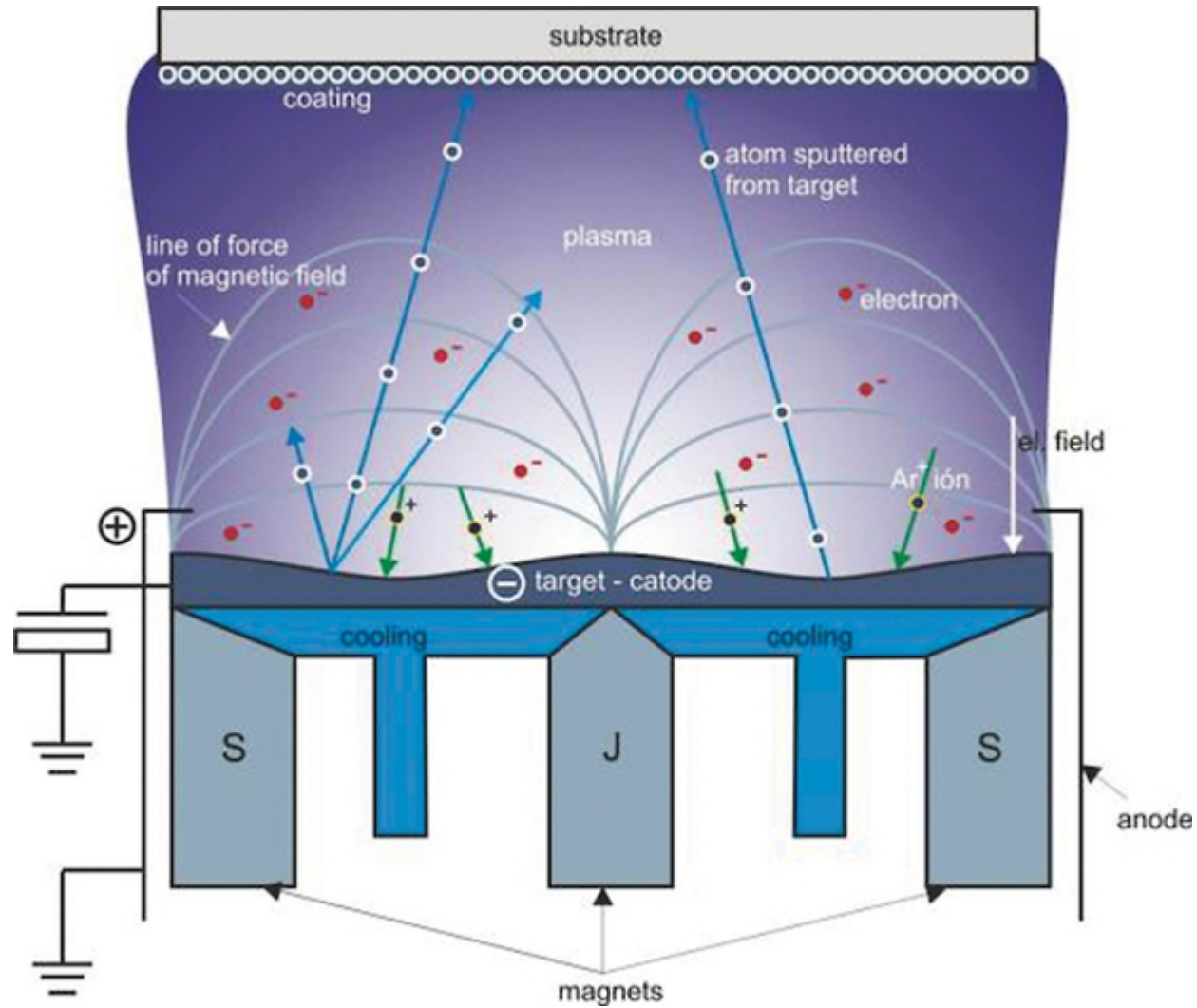
Lavorazioni



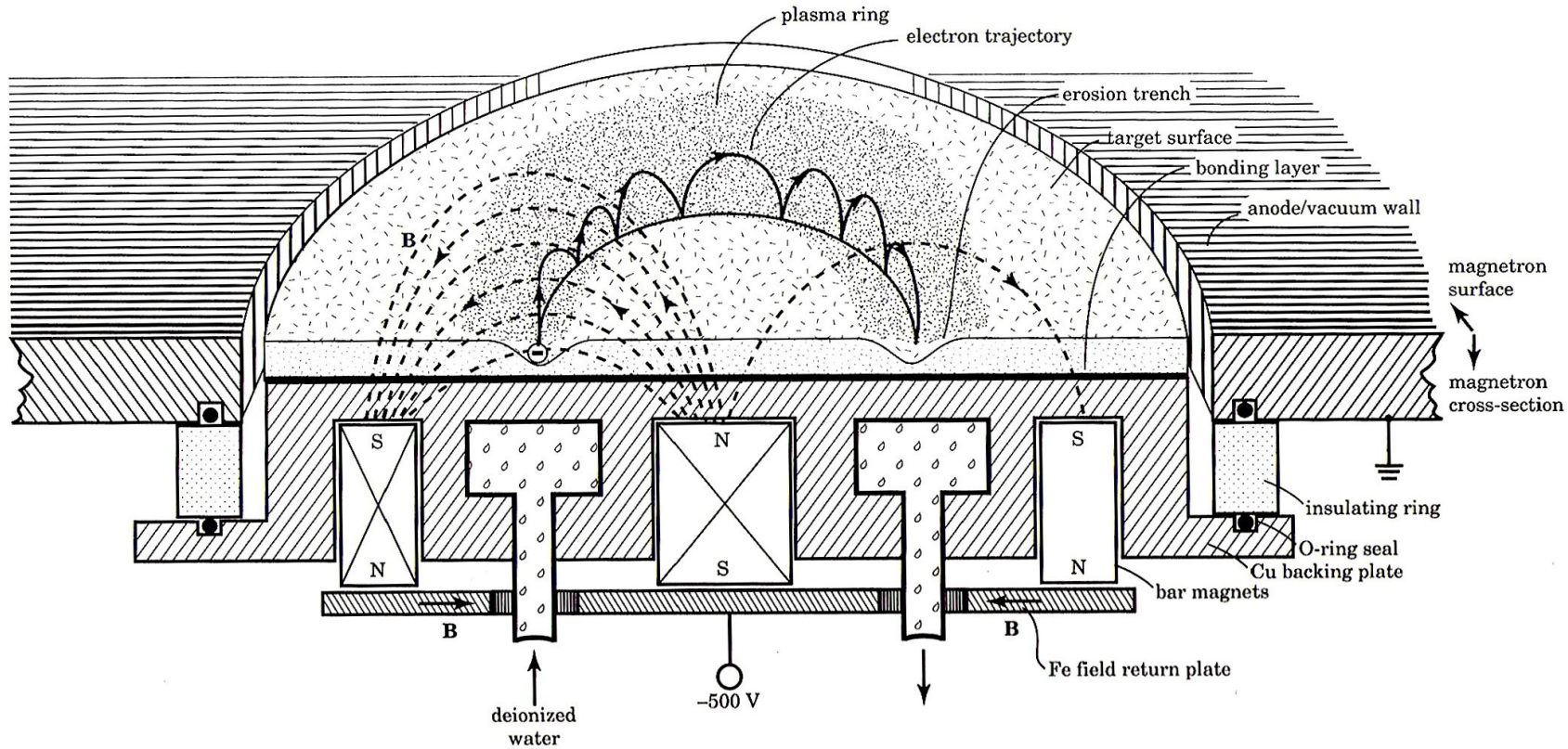
Lavorazioni



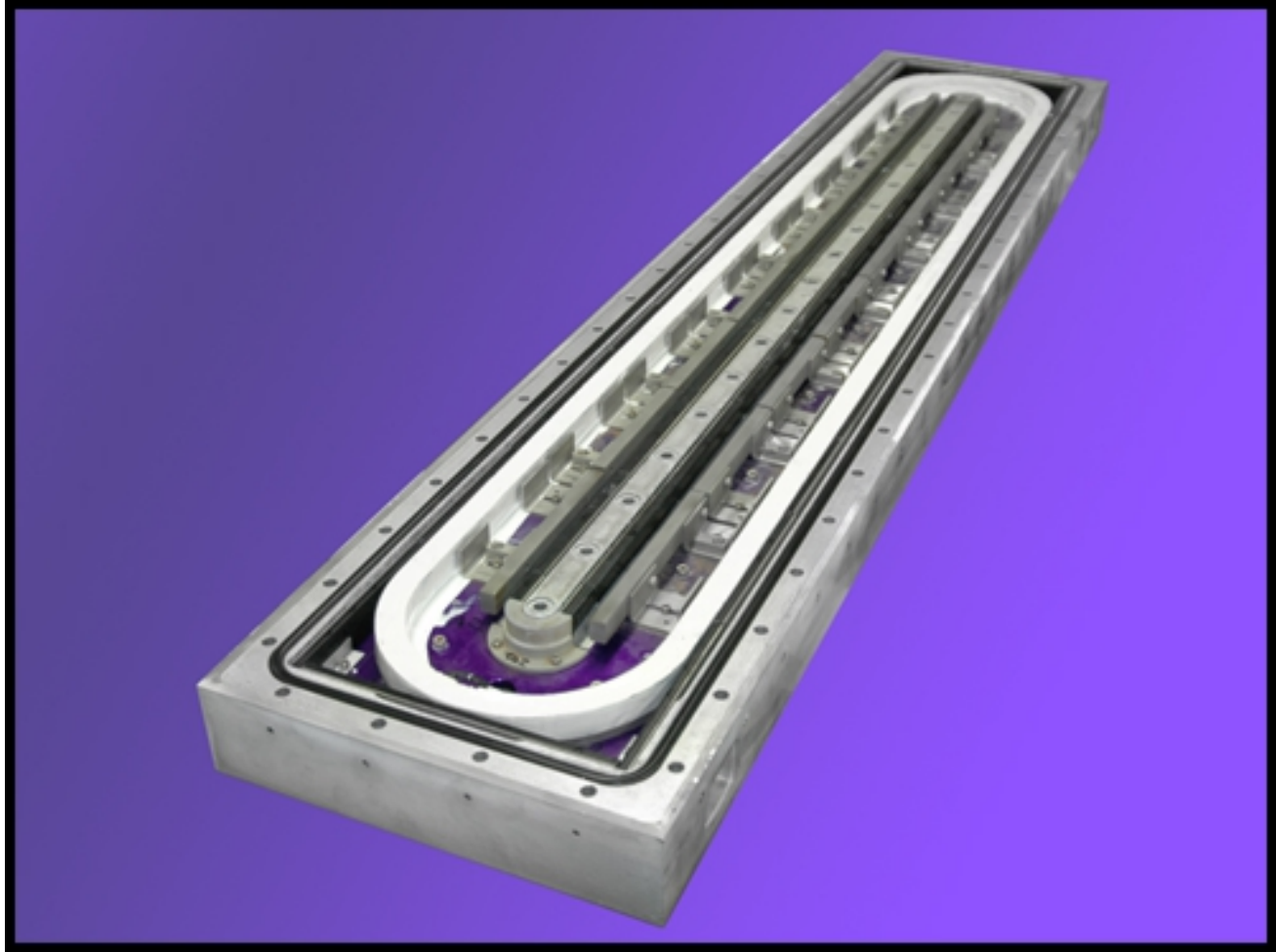
Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



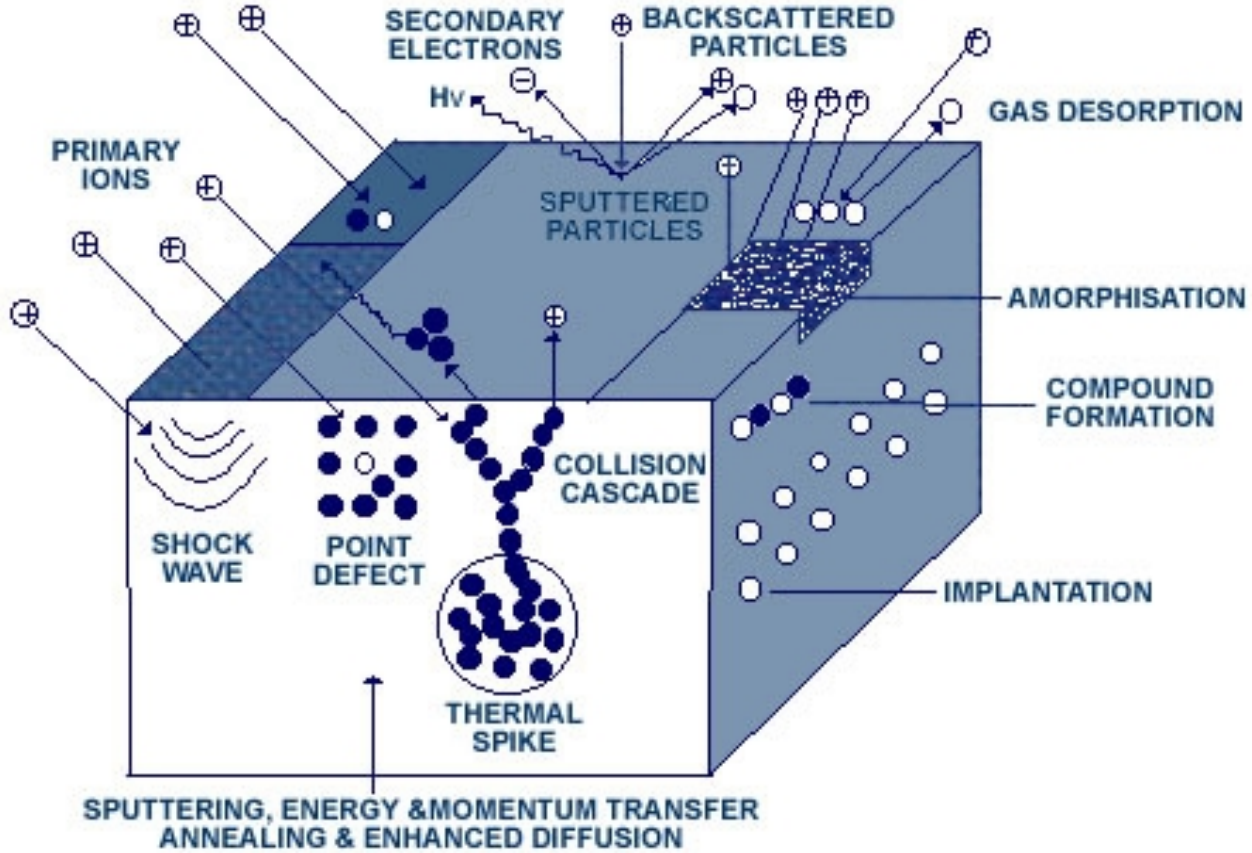
Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



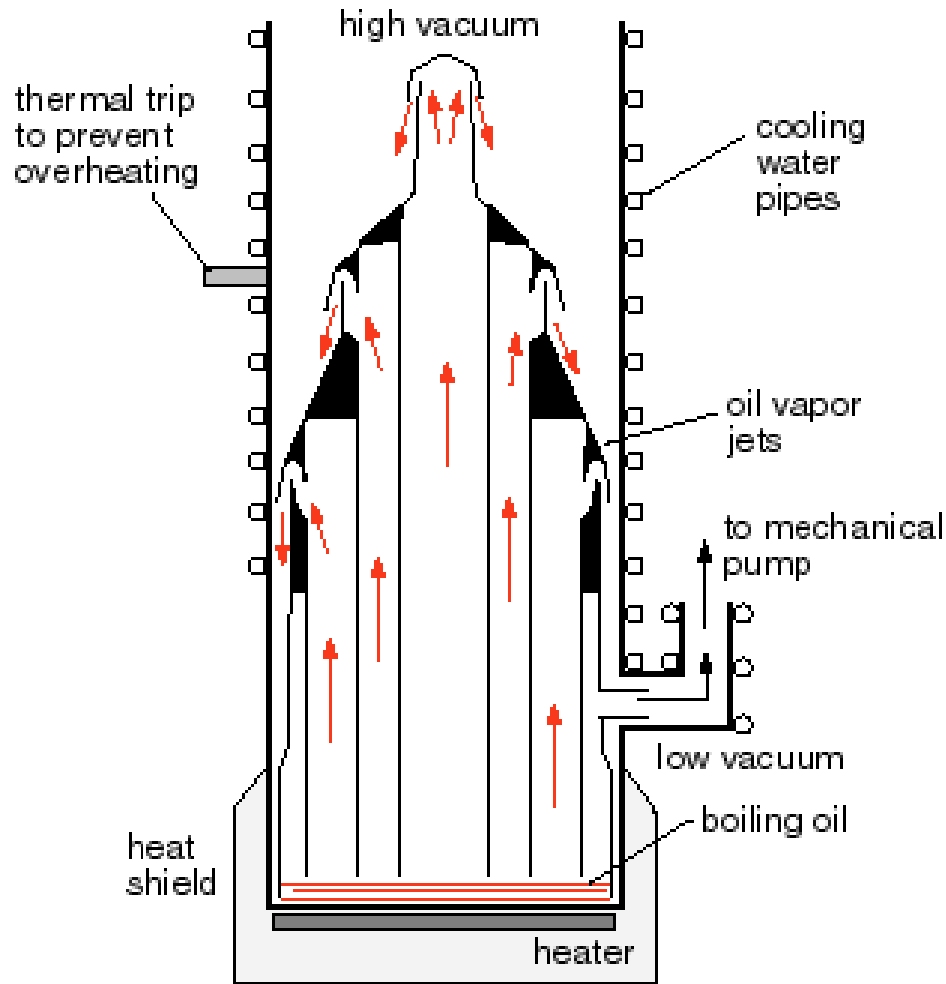
Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



- 1 Heater
 - 2 Boiler
 - 3 Pump body
 - 4 Cooling coil
 - 5 High vacuum flange
 - 6 Gas molecules
 - 7 Vapor jet
 - 8 Backing vacuum connection
- A }
B } Nozzles
C }
D }

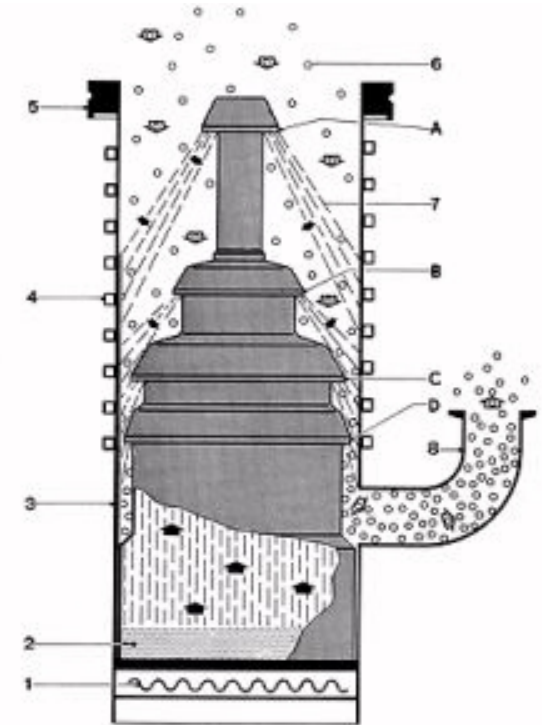
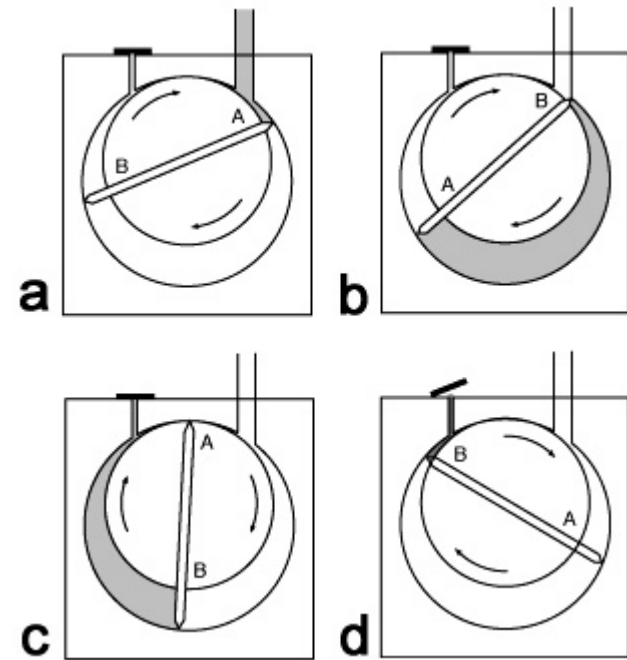


Fig. 2.44
Mode of operation of a diffusion pump

Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering

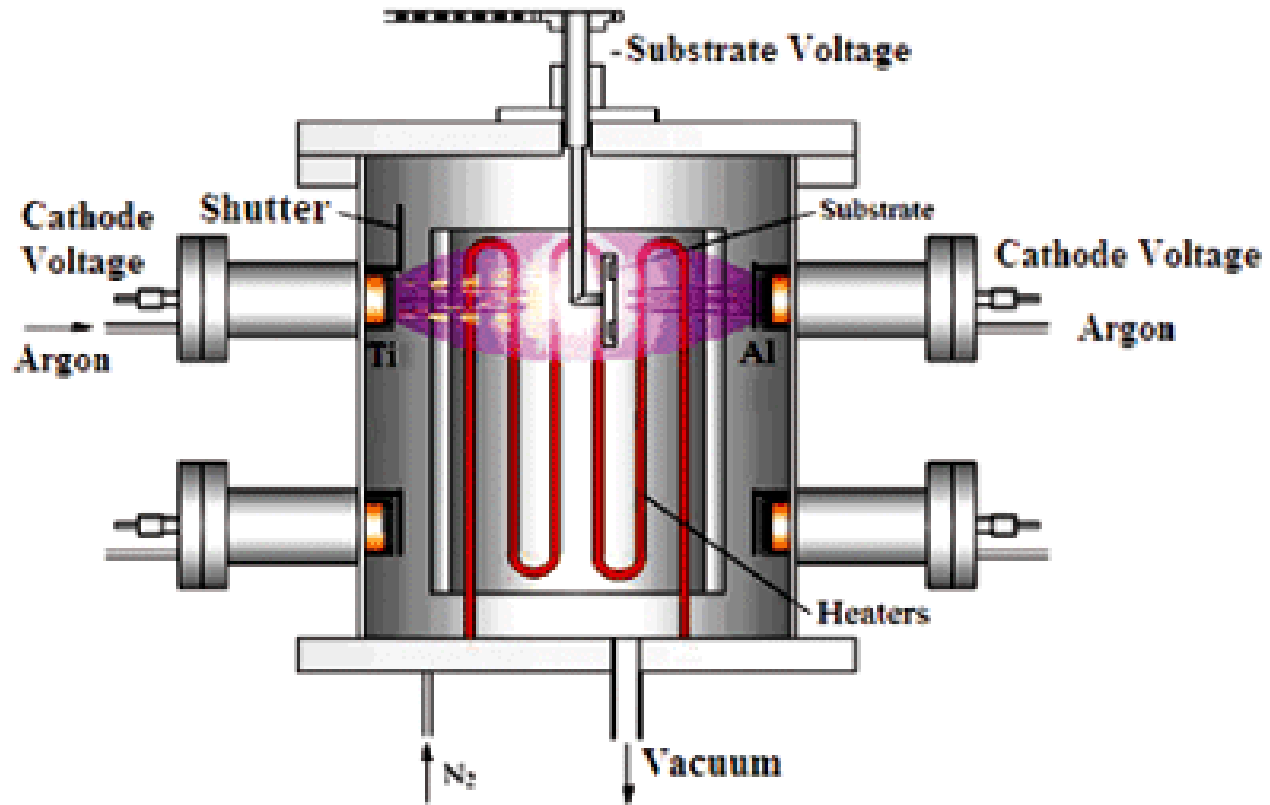
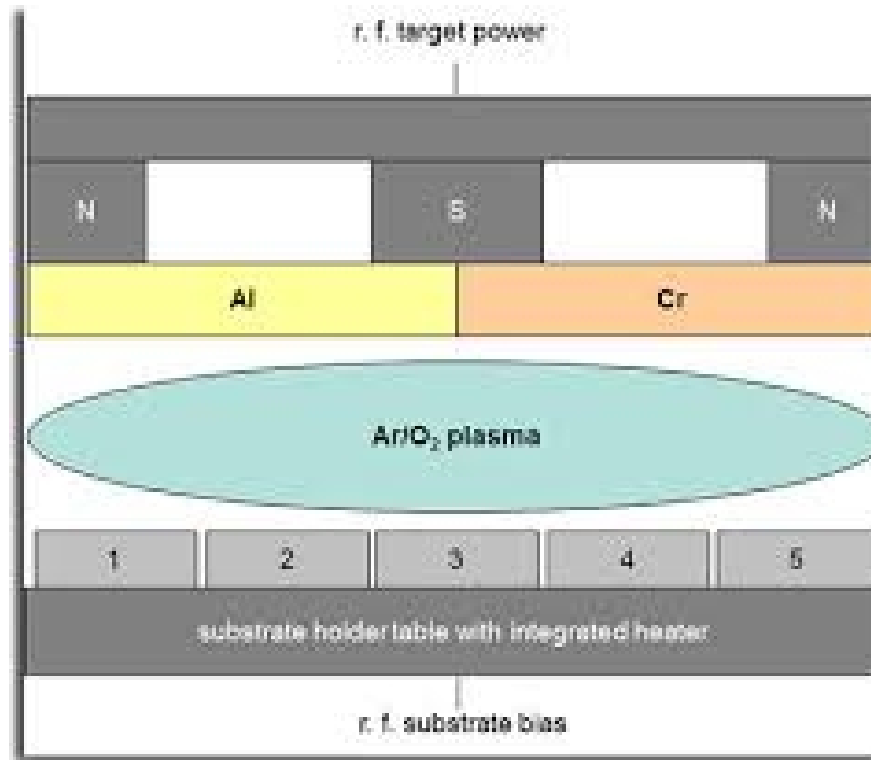
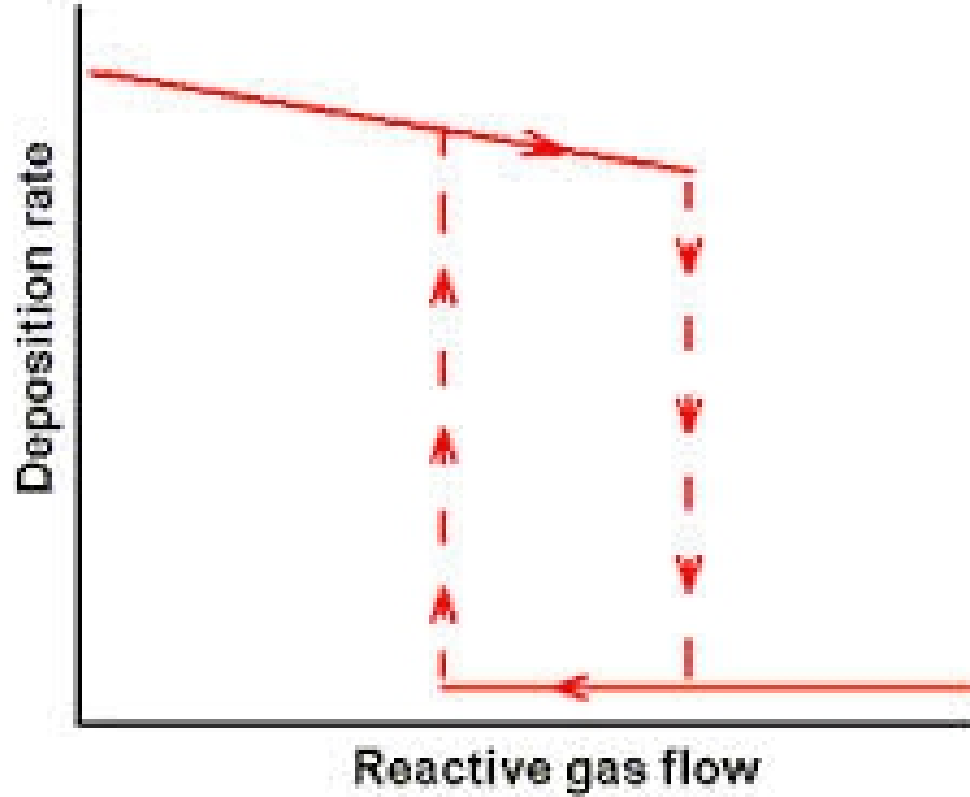


Figure 1. Schematic design of magnetron sputtering for TiN/TiAlN thin film deposition.

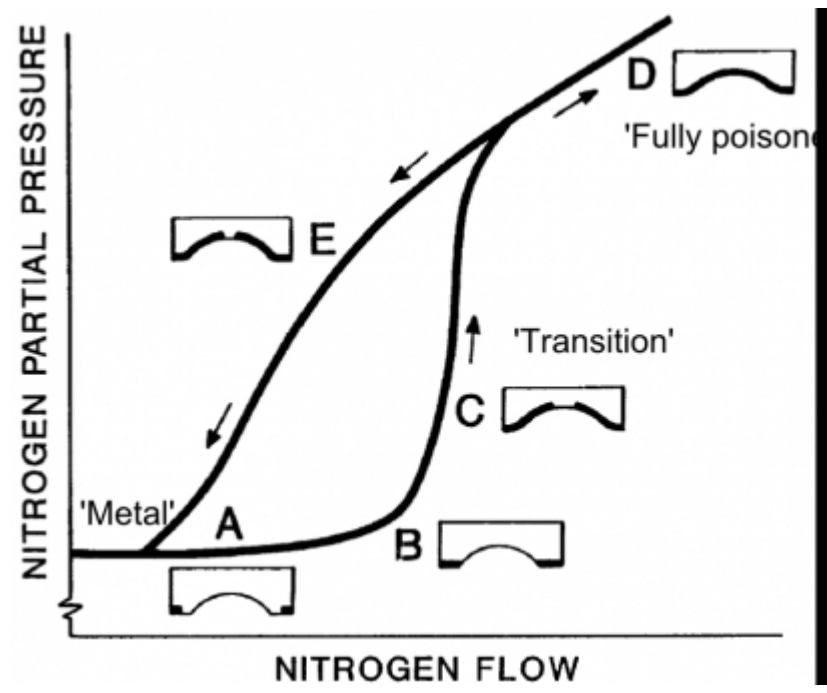
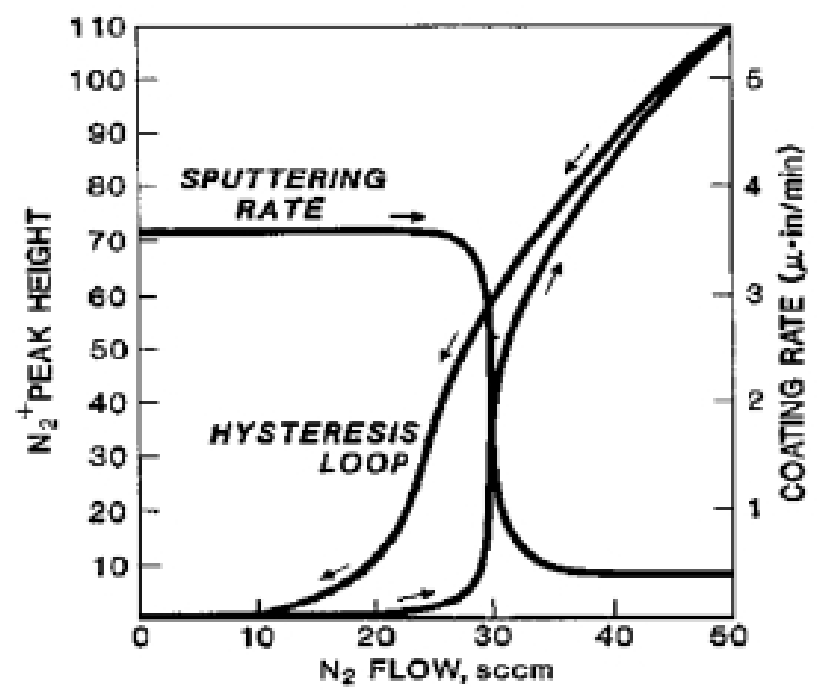
Rivestimenti PVD: sputtering



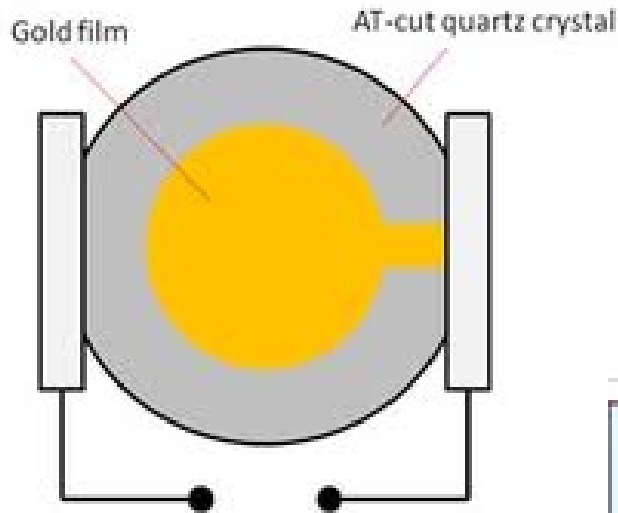
Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering

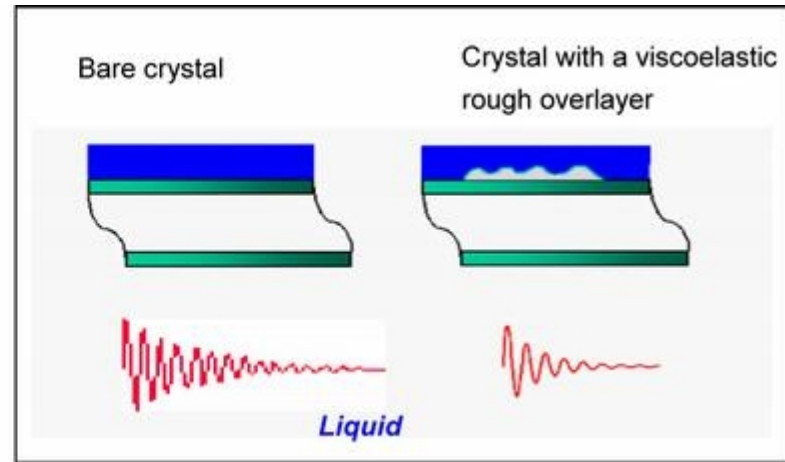
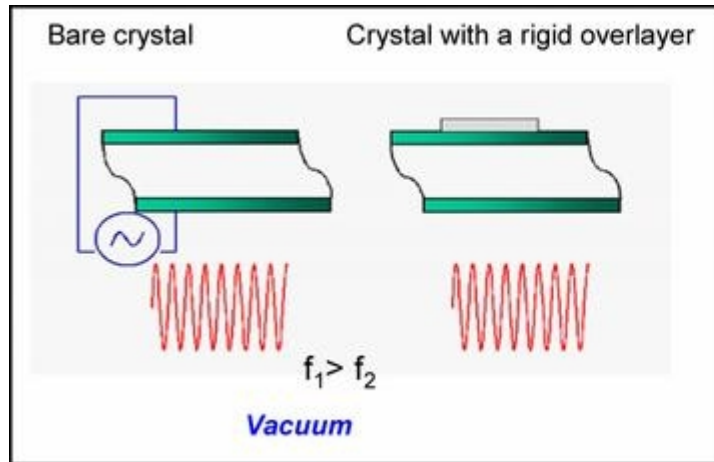


AT cut Quartz

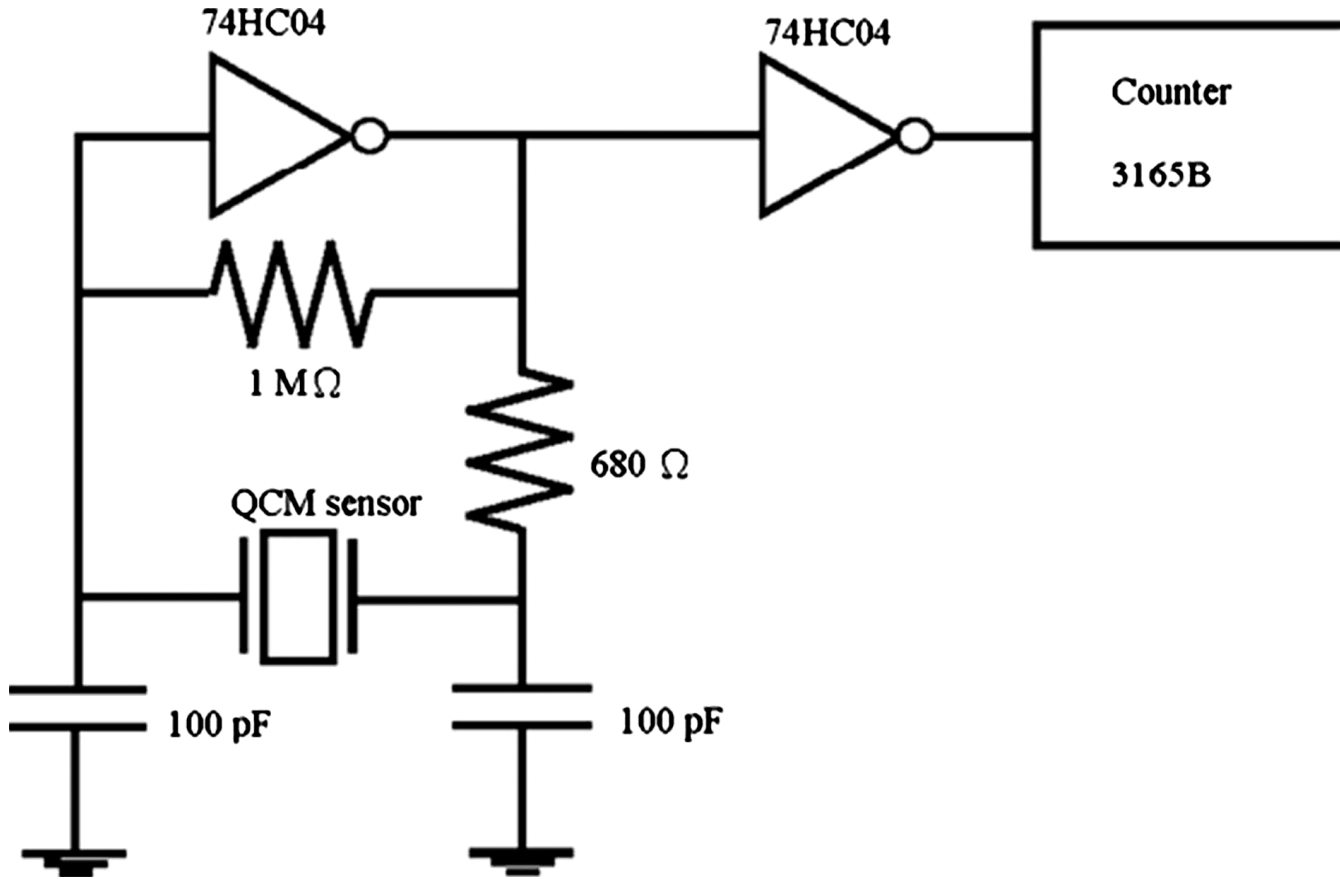
This composite image illustrates the AT cut quartz crystal. It includes:

- A 3D geometric diagram of a quartz crystal showing the AT cut orientation with axes Z , Z' , X , and Y' . The angle between the Z and Z' axes is $30^\circ 10'$, and the angle between the X and Z' axes is 49° . The AT cut is indicated by a line on the crystal face.
- A top-down view of the AT-cut quartz crystal with a yellow gold electrode on the upper side and a grey gold electrode on the lower side. Labels include "AT-Cut QUARTZ CRYSTAL", "Quartz plate", "Gold electrode (upper side)", and "Gold electrode (lower side)".
- A side view of the "AT Cut Slice" showing the Y' and Z' axes and an electric field vector $E_{Y'}$ pointing along the Y' axis.
- Two photographs: one showing a physical quartz crystal component in a holder, and another showing two circular quartz crystals with gold electrodes.

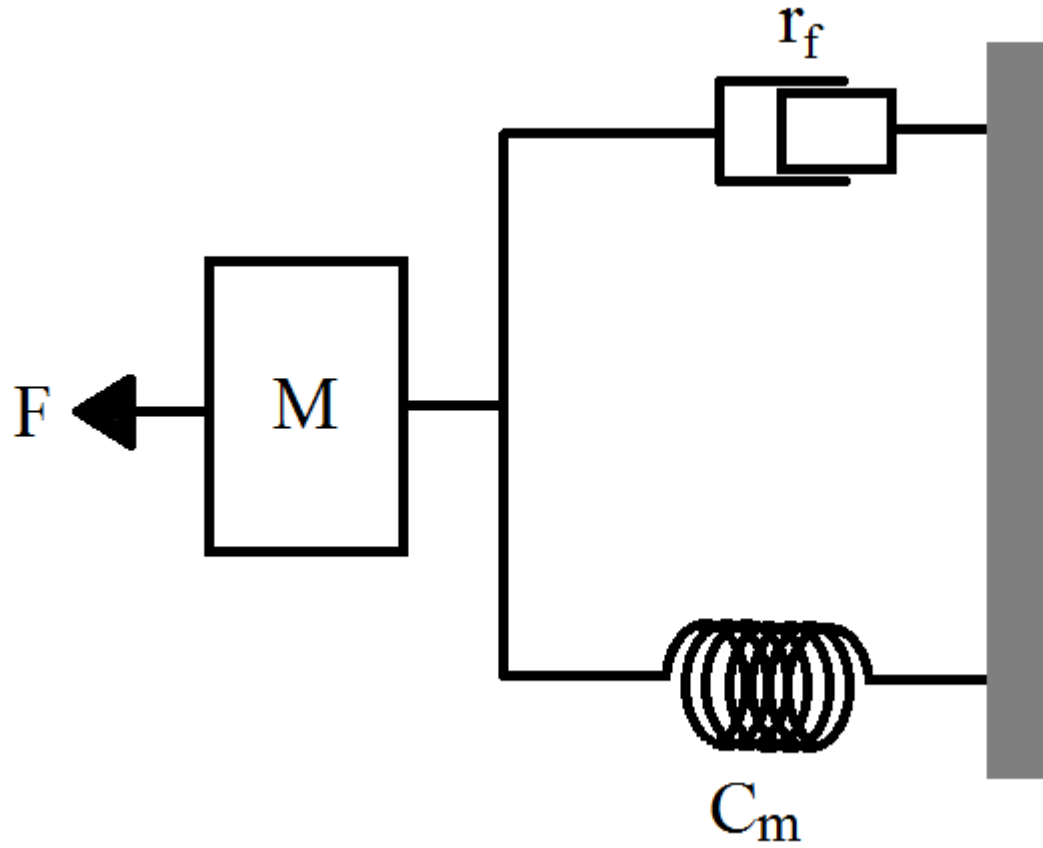
Rivestimenti PVD: sputtering



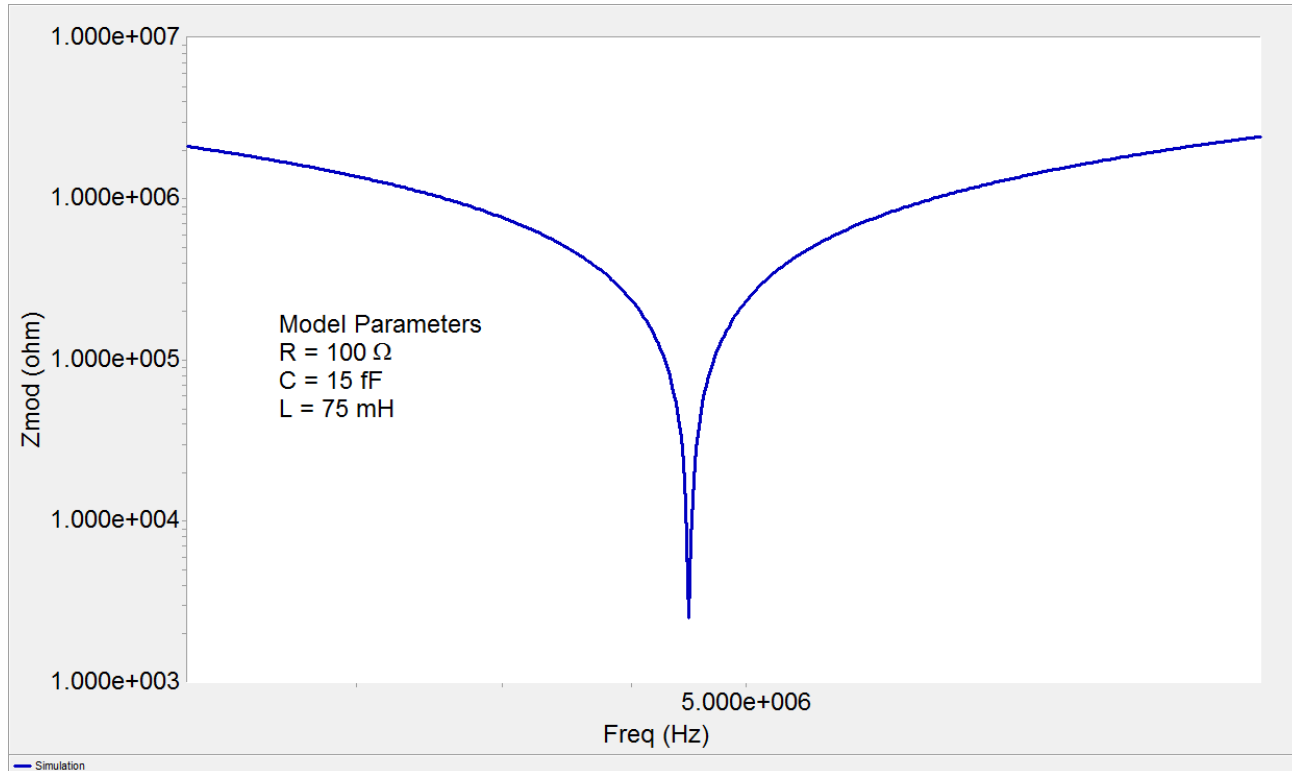
Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering



Rivestimenti PVD: sputtering

