

## **Modifiche speciali della geometria dei denti dei coltelli rasatori**

*In questo articolo si esaminano alcuni aspetti tecnici che vengono risolti nelle moderne affilatrici per coltelli rasatori.*

*Vengono approfonditi in particolare i metodi per ottenere le correzioni di profilo, quelle di elica e il "twisting del dente". Si illustrano inoltre alcuni dispositivi che facilitano e rendono più precisa l'operazione di affilatura.*

---

### La rasatura è ancora largamente diffusa

L'operazione di rasatura è sempre di attualità anche se negli ultimi anni si sono moltiplicati i casi in cui la finitura degli ingranaggi viene eseguita dopo il trattamento termico con la rettifica dei denti o con il metodo della levigatura (*honing*).

E' logico che sia così se si pensa che il costo complessivo dell'operazione di rasatura è solo una frazione del costo complessivo della rettifica.

I tempi di produzione infatti sono molto inferiori e ciò significa minor numero di macchine necessarie e quindi minor investimenti, senza contare il fatto che le rettifiche per ingranaggi hanno costi di acquisto e di gestione superiori alle macchine rasatrici.

Bisogna considerare inoltre che non tutti gli ingranaggi possono essere rettificati, come per esempio quelli sotto battuta, che possono essere finiti quasi sempre con la rasatura *underpass* o *plongée*.

E poi esiste una vastissima gamma di ingranaggi in cui non è richiesta una grande precisione, quale si può ottenere con la rettifica; basti citare tutte le marce "basse" (1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e retromarcia), tutti gli ingranaggi per le macchine agricole e per tutte le trasmissioni che operano a bassa velocità.

E' ben vero che recentemente le macchine rettificatrici sono state oggetto di perfezionamenti che le hanno rese più veloci, più precise e molto più flessibili, ma il loro costo rimane ancora troppo alto per molti produttori di ingranaggi.

Molti altri produttori invece hanno privilegiato la qualità degli ingranaggi e sono passati alla rettifica, specie nel settore delle trasmissioni per veicoli industriali.

Tuttavia la rasatura rimane ancora e, secondo me, lo rimarrà anche per il prossimo futuro, l'operazione più economica e largamente diffusa per la finitura degli ingranaggi.

In generale, il consumo di coltelli rasatori, a livello mondiale, probabilmente si è ridotto negli ultimi anni e ciò può essere dovuto, come si è detto, all'avanzata delle operazioni di rettifica e di levigatura ed al naturale progresso nella progettazione, costruzione e manutenzione dei rasatori.

Ma soprattutto la vita media di un rasatore è aumentata in modo notevole perché si sono ridotti del circa il 50% i soprametalli lasciati dalla dentatura.

Alcuni anni fa era normale lasciare un soprametallo di 0,04 – 0,05 mm per fianco, che serviva a compensare tutta una serie di errori in dentatura.

Oggi invece è normale lasciare un soprametallo di 0,02 – 0,03 mm e ciò grazie alle più perfezionate dentatrici che consentono di limitare gli errori di profilo e di elica.

Questi fattori avrebbero dovuto far diminuire massicciamente il consumo generale di rasatori, ma sono subentrate alcune cause che hanno compensato in parte questa tendenza.

In primo luogo c'è la maggior produzione di ingranaggi, specie nell'area asiatica, in secondo luogo oggi è richiesta una maggiore precisione nell'esecuzione di profili ed eliche in rasatura con un loro più elevato grado di complessità.

E' logico pensare che se la tolleranza sul profilo e sull'elica è molto ridotta, il rasatore eseguirà un minor numero di pezzi prima di dover essere riaffilato per riportare il profilo in tolleranza. Questo è tanto più vero nelle lavorazioni con il metodo a *plongée*, dove i profili dei rasatori sono più complessi e l'azione di taglio è, in un certo senso, più difficile rispetto ad una lavorazione con il metodo tradizionale.

Infine c'è la tendenza, oggi, a ridurre l'altezza dei dentini, sulle orme di quanto già stanno facendo i costruttori giapponesi da molti anni.

Da prove effettuate in Giappone, è risultato, con una certa evidenza, che riducendo di un 15 – 20% la profondità dei canalini, aumenta la precisione del profilo e, quel che più conta, che questa precisione si mantiene per un maggior numero di pezzi. Alcuni casi di scarsa precisione nella rasatura sono stati appunto risolti con la riduzione dell'altezza della dentinatura.

Ciò, si presume, sia dovuto alla riduzione delle micro-flessioni dei dentini del rasatore.

Naturalmente la riduzione dell'altezza della dentinatura riduce di molto il numero di affilature possibili e quindi la vita totale del rasatore.

Fortunatamente (per gli utilizzatori), c'è anche qualcosa che migliora la vita dei rasatori. Per esempio, si sono sviluppati dei processi di indurimento superficiale, diversi dal ricoprimento TiN, che aumentano in certa misura il numero di pezzi eseguibili tra due affilature. Un esempio di questa nuova tecnica è il *trattamento criogeno*, che consiste essenzialmente nell'immergere i coltelli per un certo numero di ore (24 – 60) nell'azoto liquido a -196 °C.

Insomma in questo campo si intrecciano cause che aumentano il rendimento dei rasatori ed altre che lo riducono, con un bilancio, per il momento, che ha portato ad una riduzione complessiva, ma non molto marcata, degli utensili consumati.

Tutta questa lunga premessa per dire che tuttavia vale ancora la pena di parlare della rasatura e delle problematiche ad essa collegate, perché questa è ancora un'operazione fondamentale nell'industria dell'ingranaggio.

### Affilatura dei coltelli rasatori

Per ottenere dei buoni risultati in rasatura, dal punto di vista della precisione e del rendimento, è assolutamente necessario che il coltello rasatore sia affilato correttamente, cioè che presenti i minori errori possibili sul profilo, sull'elica e sulla divisione.

Si è già accennato al fatto che oggi i profili richiesti sui rasatori sono generalmente molto più complessi che in passato e questo è dovuto alle maggiori esigenze di silenziosità delle trasmissioni ed alla estensione della rasatura a tuffo (*plongée*).

Le moderne macchine affilatrici sono completamente gestite dal Controllo Numerico e dispongono di funzioni che nelle macchine della generazione precedente erano semplicemente impensabili.

Non si può parlare ancora di modifiche topologiche nel vero senso della parola, ma i softwares sono diventati estremamente sofisticati e permettono di ottenere qualsivoglia profilo e forma di elica in tempi relativamente brevi.

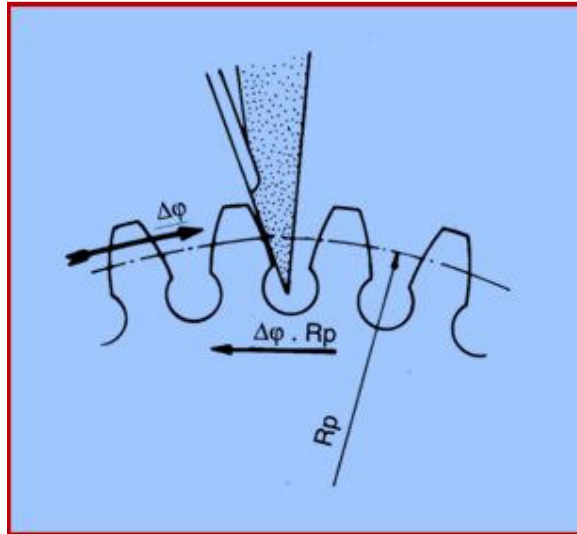
Nella stampa tecnica specializzata sono stati diffusamente illustrati i vantaggi che derivano dall'applicazione sulle rettifiche in genere e sulle affilatrici per rasatori in particolare, dei *motori lineari* e degli azionamenti *direct drive*, e più in generale dell'adozione della tecnologia elettronica digitale.

Qui verranno esaminate alcune particolarità tecniche relative alla modifica del profilo, dell'elica e delle problematiche che si trovano durante la diamantatura della mola.

### Esecuzione di profili speciali

Lo scostamento dal profilo teorico può assumere la forma di una semplice variazione dell'angolo di pressione e la via più semplice per ottenere questa modifica è quella di variare in modo corrispondente il rapporto tra la velocità di rotazione del rasatore e la velocità del suo spostamento lineare.

E' noto che per ottenere il profilo teorico ad evolvente, ad ogni rotazione del coltello  $\Delta\alpha$  deve corrispondere uno spostamento lineare del coltello stesso di:  $\Delta x = \Delta\alpha \cdot R_p$  dove  $R_p$  è il raggio del cerchio primitivo di rotolamento ed  $\alpha$  è l'angolo di pressione in P (inclinazione della mola) corrispondente a quel cerchio di rotolamento.



**Figura N°1-** Cinematica della generazione del profilo ad evolvente

Se lo spostamento è maggiore o minore di questa quantità, l'angolo di pressione ottenuto sul coltello sarà in modo corrispondente maggiore o minore dell'angolo di pressione teorico.

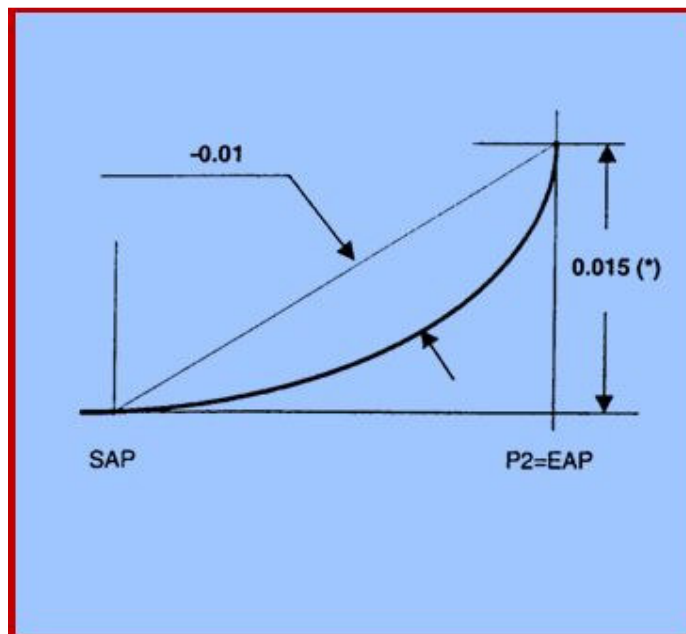
Detto  $\alpha_1$  l'angolo di pressione effettivo si ha quindi:

$$\Delta x > \Delta \alpha \cdot R_p \Rightarrow \alpha_1 > \alpha \quad ; \quad \Delta x < \Delta \alpha \cdot R_p \Rightarrow \alpha_1 < \alpha \quad (1)$$

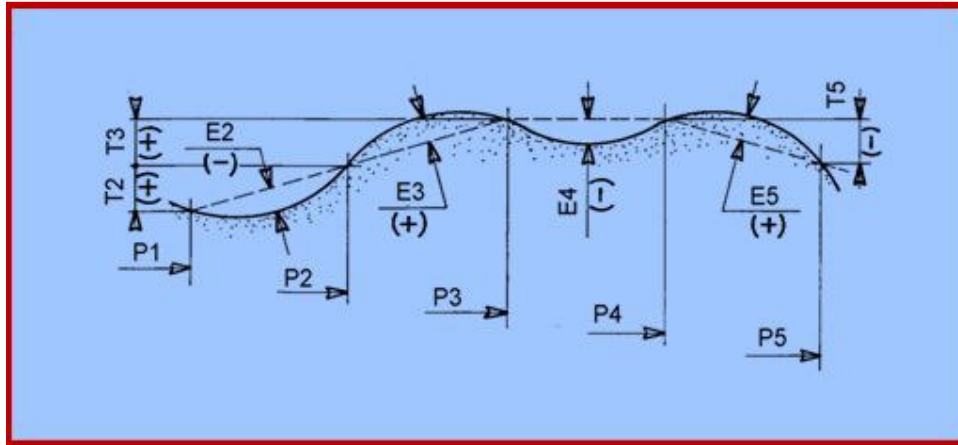
Questa considerazione tornerà utile quando si parlerà del *twisting* del dente.

Una variazione più complessa del profilo viene eseguita modificando il profilo della mola durante la diamantatura.

Supponiamo di dover eseguire i due profili come indicato in figura N°2 ed in figura N°3.



**Figura N°2-** Profilo definito da due punti



**Figura N°3- Profilo definito da cinque punti**

La prima modifica è molto semplice e comune, mentre nel secondo esempio il profilo è molto complesso e difficilmente si troverà in pratica, ma serve bene a capire il metodo con cui si opera.

Il profilo viene diviso in un certo numero di intervalli. Questo numero può essere scelto a piacere, ma con 4 intervalli le varianti di profilo ottenibili coprono praticamente il 100% dei casi. Per ogni tratto si può scegliere liberamente l'ampiezza, la concità e concavità o convessità.

Tutti i parametri, cioè la distanza dall'origine, la concità del tratto e la sua curvatura, sono esprimibili con una serie di tre valori:

- *estensione dell'intervallo* : da  $P_1$  a  $P_5$
- *conicità*: da  $T_1$  a  $T_5$
- *cavità o convessità*: da  $E_1$  a  $E_5$

Per il profilo di fig.N°2 (un solo intervallo con due punti) i dati da inserire sono:

$P_1 = \text{SAP} = 16,5$	--	--
$P_2 = \text{EAP} = 44,0$	$T_2 = 0,015$	$E_2 = -0,01$
SAP = Start of Active Profile                      EAP = End of Active Profile		

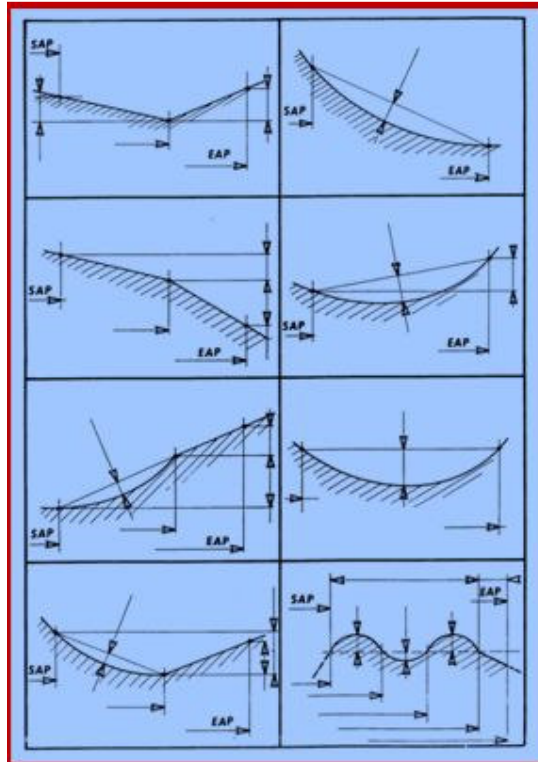
Per il profilo di fig. N°3 (4 intervalli con 5 punti) bisogna inserire i seguenti dati:

$P_1 = \text{SAP} = 16,5$	--	--
$P_2 = 21,5$	$T_2 = 0,008$	$E_2 = -0,005$
$P_3 = 26,5$	$T_3 = 0,008$	$E_3 = 0,005$
$P_4 = 31,5$	$T_4 = 0,000$	$E_4 = -0,005$
$P_5 = 36,5$	$T_5 = -0,008$	$E_5 = 0,005$

Bisogna notare che l'ampiezza dell'intervallo e la posizione del punto  $P_1$  non si riferisce alla lunghezza dell'evolvente, ma alla distanza tra il punto considerato del profilo ed il punto di tangenza con il cerchio di base, si ha cioè:

$$\overline{AP} = R_b \cdot tg \alpha$$

Nella figura N°4 sono indicati alcuni esempi di profili eseguibili sulle moderne affilatrici a CNC.



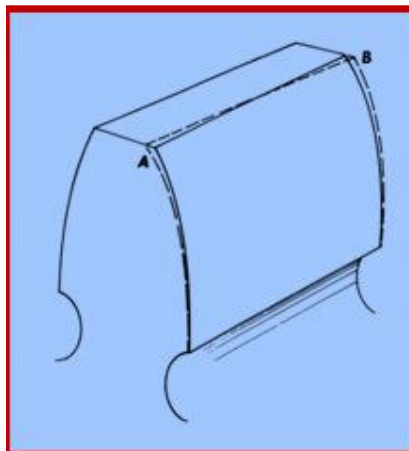
**Figura N°4-** Esempi di profili eseguibili con le moderne affilatrici CNC

#### Twisting del dente

Nel metodo di rasatura a plongée, il coltello non si sposta in senso assiale, ma l'avanzamento avviene solo radialmente. Se si vuole quindi lavorare tutta la larghezza del dente dell'ingranaggio il contatto deve avvenire lungo tutta la larghezza del dente.

E' necessario considerare che l'accoppiamento tra coltello ed ingranaggio avviene lungo assi sghembi e quindi il piano che taglia l'ingranaggio perpendicolarmente al suo asse, taglierà il coltello con una sezione ellittica.

Se l'ingranaggio ha denti dritti (elica a zero gradi), ciò non provoca particolari problemi, ma se i denti sono elicoidali e quindi la linea di contatto attraversa il dente con una direzione fortemente obliqua, è necessario differenziare la modifica del dente lungo tutta la larghezza del dente del coltello. Nella figura N°5 è indicato questo tipo di modifica: nella sezione A il profilo è corretto in meno, mentre nella sezione B il profilo è corretto in più.



**Figura N°5-** Dente di ingranaggio con twisting

Questa modifica è ottenibile con una certa facilità con le affilatrici a controllo numerico, attivando un particolare software che fa variare il rapporto tra le velocità degli assi di rotazione e di traslazione del pezzo durante la loro interpolazione in fase di generazione del profilo.

Si tratta in sostanza di variare in continuazione questo rapporto in modo che l'angolo di pressione effettivo passi gradualmente da un valore minore ad un valore maggiore di quello teorico.

A questo proposito basta considerare la relazione (1) di poco sopra.

Questo software risulta utile anche nel caso opposto, cioè quando il profilo nelle diverse sezioni risulterebbe diverso e si voglia invece averlo uguale.

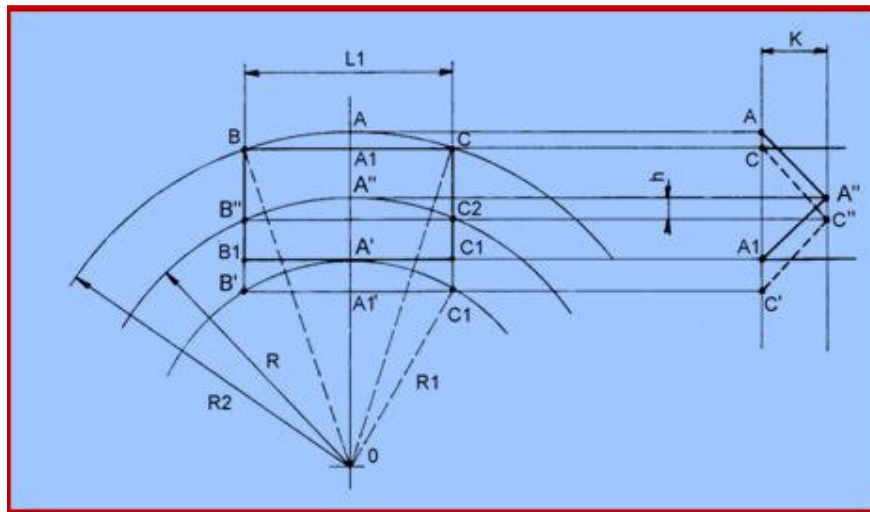
Approfondiamo un po' questo punto.

Quando si esegue un'affilatura con un profilo diverso da quello teorico, il profilo voluto è riscontrabile solo nella sezione centrale del dente del coltello. Nelle altre sezioni il profilo sarà diverso.

La ragione di ciò va ricercata nel fatto che il coltello viene affilato con una mola fissa, cioè che non trasla lungo la direzione assiale del dente.

Il profilo della mola sarà quello voluto in tutte le sezioni radiali, cioè lungo le rette OA – OB – OC (figura N°6).

Quindi nelle sezioni BB' e CC', poiché non sono radiali, i profili saranno diversi da quelli voluti, cioè da quello che si trova nella sezione AA'.



**Figura N°6**-Differenza tra i profili nella sezione radiale ed in quelle con piani paralleli alle facciate del rasatore

Nella figura N°6 è schematizzata una situazione in cui le dimensioni sono fuori scala per rendere più facilmente comprensibile quanto si vuole dire.

Supponiamo che il profilo voluto sia quello a K, con il profilo che si discosta da quello teorico di un valore K sia al piede, sia alla testa del dente dividendo il dente stesso in due parti simmetriche.

Osservando quello che succede nella sezione CC', si vede che in primo luogo il punto A'' si abbassa fino a C'' di una quantità h che dipende dalla larghezza del dente del coltello L<sub>1</sub> e dal raggio della mola R in quel punto, secondo il valore:

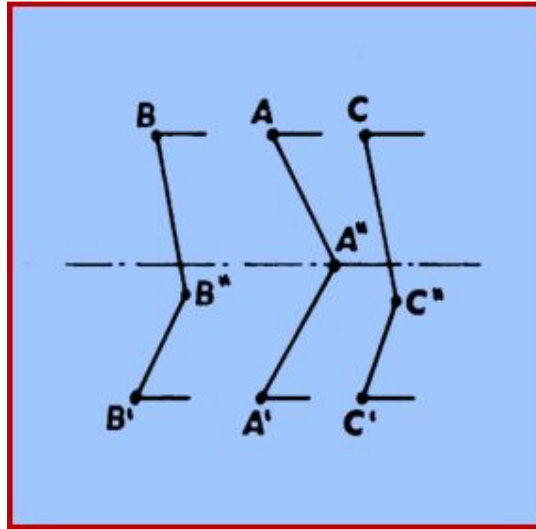
$$h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{L_1}{2}\right)^2} \quad (2)$$

Oltre a questa variazione della posizione del profilo però, si ha anche una variazione delle inclinazioni dei tratti C''C' e C''C rispetto ai rispettivi tratti A''A' ed A''A. Infatti, a parità del valore di K, si hanno variazioni maggiori dello spostamento del profilo, cioè si potrà scrivere: CC' > AA'.

La differenza  $CC' - AA' = \Delta$  non potrà essere nulla perché corrisponde alla differenza tra le frecce  $AA_1$  e  $A_1'A'$  che non sono uguali perché i raggi  $R_1$  ed  $R_2$  sono diversi.

Ne deriva che questa variazione di profilo sarà tanto maggiore quanto più è largo e quanto è più alto il dente del rasatore.

Se si esegue il controllo del profilo sulle tre sezioni A, B, C, si avrà un grafico schematizzato in figura N°7



**Figura N°7-** Schematizzazione dei profili, diversi dal teorico, ottenuti nelle diverse sezioni del dente

Questa differenza di profilo nelle varie sezioni del dente è particolarmente evidente sui coltelli di fascia larga, elica rilevante (*che allunga il dente*) e con dentature di grosso modulo.

L'influenza di questa variazione di profilo si ripercuote, in certa misura, anche sulla forma dell'elica ma, come si è detto, questo tipo di errore può essere corretto in una certa misura con le moderne affilatrici.

Quanto sopra esposto è una delle varie ragioni per cui la mola dell'affilatrice per coltelli rasatori ha un diametro relativamente grande.

#### La modifica dell'elica

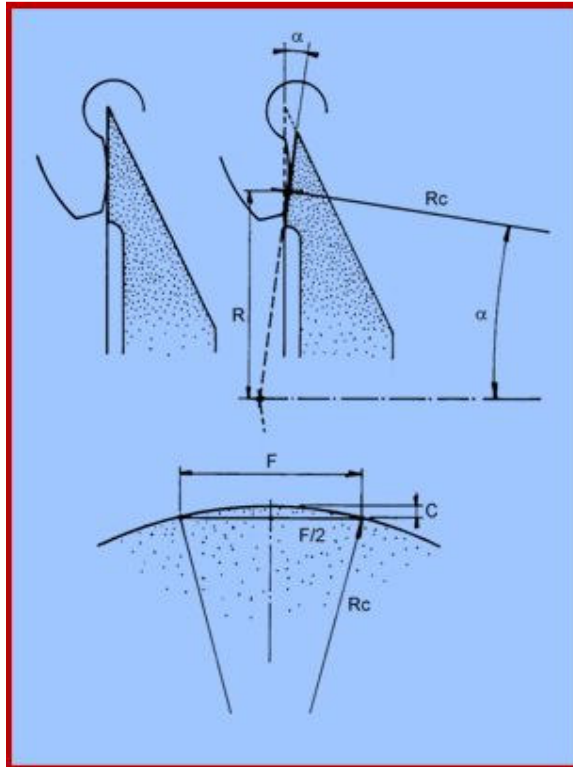
Se si tratta di modificare leggermente l'angolo dell'elica, magari per ottenere un dente leggermente conico, è sufficiente modificare l'angolo di impostazione della macchina.

Talvolta si esegue questa modifica per ottenere un effetto anti-sganciamento delle marce in alcuni tipi di cambio (specie sull'ingranaggio della retromarcia).

Ma la correzione più frequente è senz'altro l'esecuzione della cavità d'elica sul rasatore per ottenere una bombatura sull'ingranaggio.

La bombatura dell'elica dell'ingranaggio, che può andare da qualche micrometro a 2÷3 centesimi di millimetro ha lo scopo di assicurare il contatto tra ruota e controruota, verso il centro della fascia annullando gli eventuali errori di allineamento dei due ingranaggi accoppiati nella scatola cambio.

La cavità sul coltello si ottiene modificando la mola nella sua parte piana perpendicolare al suo asse, cioè la parte attiva della mola, quella che viene in contatto con il fianco del dente, come indicato in figura N°8 .



**Figura N°8-** Indicazione di come si ottiene la cavità dell'elica in affilatura

La facciata della mola viene diamantata con un angolo  $\alpha$  che trasforma la parte piana in una parte di una superficie laterale di un cono avente il vertice in V. Il raggio di curvatura di questa superficie è  $R_c$ . Questa superficie conica si *stampa*, in parole povere, sulla superficie del dente dell'ingranaggio producendo la cavità. Con riferimento alla figura N°8 si può calcolare la cavità C prodotta su una certa fascia F del coltello con un angolo di conicità di  $\alpha$ , oppure, dato il valore della cavità C su una certa fascia si può calcolare il valore dell'angolo da assegnare alla mola.

$$R_c = \frac{R}{\sin \alpha} \quad ; \quad C = R_c - \sqrt{R_c^2 - \left(\frac{F}{2}\right)^2} \quad ; \quad \sin \alpha = \frac{2C \cdot R}{C^2 + \left(\frac{F}{2}\right)^2} \quad (3)$$

**Esempio**

Supponiamo che la mola, nel punto che si considera abbia un diametro di 750 mm, cioè un raggio  $R = 375$  mm, e che la fascia del coltello sia di  $F = 25$  mm.

Se si modifica la mola con un angolo di  $10^\circ$  si otterrà una cavità di  $C = 0,036$  mm.

Se invece, nelle stesse condizioni si volesse ottenere una cavità di  $C = 0,01$  mm si dovrebbe assegnare alla mola un angolo di conicità di  $\alpha = 2,75^\circ$ .

Bisogna notare che la massima cavità ottenibile con un certo tipo di affilatrice dipende dal minimo angolo di pressione su cui può essere piazzata la mola.

Nell'esempio illustrato nella figura N°8 si suppone che la mola (prima della modifica) sia piazzata con un angolo di pressione di  $0^\circ$ .

Modificando la mola con un angolo di pressione di  $\alpha^\circ$ , si può affilare un coltello utilizzando questo angolo di pressione ed ottenendo una cavità calcolata con questo valore.



### Il controllo in macchina

Fino a qualche anno fa una considerevole parte del tempo necessario ad affilare un rasoio era costituita dalla messa a punto delle correzioni del profilo e dell'elica.

Per prima cosa si eseguiva il *dentino*, cioè la rettifica di un fianco di un dente, si toglieva il rasoio dalla macchina e si andava a controllare il risultato in sala misurazioni.

Il profilo e l'elica non erano mai come quelli voluti ed allora bisognava apportare qualche modifica ai dati introdotti, fare qualche regolazione e ritentare.

Questa procedura andava ripetuta dalle 2 alle 4 volte, specie se le correzioni richieste erano complesse.

Si può immaginare quanto tempo andava perso per questa serie di verifiche, anche perché l'apparecchio in sala misurazioni non era sempre libero.

Tra l'altro con questo sistema si aveva un consumo maggiore di rasoio nel corso di ogni affilatura.

Oggi le cose sono radicalmente cambiate.

Intanto la macchina si posiziona automaticamente sull'elica, sull'angolo di pressione e sull'interasse voluto, con una altissima precisione. Inoltre i dati inseriti per la correzione del profilo e dell'elica vengono trasferiti sulla mola senza quasi possibilità di errore.

Anche oggi bisogna controllare il dentino, cioè il primo fianco eseguito, ma nel 99% dei casi il risultato è buono, non solo, ma se è richiesta una piccola correzione, esempio dell'ordine di 1 – 2 micron, si imposta questa modifica e poi non è più necessario controllare il risultato. La macchina ha una risposta talmente alta che modifica esattamente la sua impostazione anche a questi livelli.

Nelle macchine più moderne è stata aggiunta un'opzione che fa ulteriormente ridurre il tempo necessario alla verifica del *dentino*.

Si tratta del *controllo in macchina*: un gruppo posizionato sulla struttura della macchina in prossimità del rasoio che, tramite un sensore può controllare il profilo, l'elica senza smontare il coltello dalla macchina.

Questo gruppo può anche controllare il coltello completo dopo l'affilatura, includendo anche il controllo della divisione dei denti.

Il sensore viene gestito sia con un asse CN autonomo sia con gli stessi assi macchina.

Se si considera ora che le macchine rasatrici dell'ultima generazione, dotate anch'esse di motori lineari e motori *direct drive* e gestite da controlli numerici a tecnologia digitale, possono interpolare gli assi in modo da generare eliche anche molto complesse, o perfino variare il metodo di rasatura dalla prima alla seconda passata, si può capire come le precisioni ottenibili sugli ingranaggi lavorati siano alte, ma soprattutto come si sia ampliata la possibilità di ottenere profili ed eliche complesse, condizione questa per avere alla fine delle trasmissioni silenziose.

*Bianco Gianfranco*