

Finitura degli ingranaggi con la levigatura esterna

La levigatura esterna o, se si vuole, l'honing esterno, consiste nel finire i fianchi dei denti dell'ingranaggio con un utensile abrasivo simile, nella sua forma esterna, ad un coltello rasatore.

In altre parole si accoppia l'ingranaggio che si deve finire con un ingranaggio costruito con lo stesso materiale di cui sono formate le mole abrasive.

Il principio di funzionamento, dal punto di vista cinematico, è quello della rasatura, ma con importanti differenze relative alle velocità di taglio, al metodo di asportazione dei trucioli ed alla precisione ottenibile.

Naturalmente si lavora l'ingranaggio dopo il trattamento termico e questo è già un grandissimo vantaggio che avvicina questo sistema alla rettifica o alla levigatura interna.

Per capire quali sono i vantaggi che si ottengono con questo metodo bisogna fare un breve riepilogo dei limiti che ha l'operazione di rasatura, cioè il sistema di finitura ancora più utilizzato nell'industria dell'ingranaggio.

Il problema più importante che si incontra nella rasatura è sicuramente il fatto che è un'operazione che deve essere eseguita sul "tenero". Ciò significa che gli sforzi per ottenere una accettabile precisione dopo l'operazione vengono spesso vanificati dalle deformazioni dovute al trattamento termico.

E' ben vero che al giorno d'oggi le deformazioni sono più gestibili, specie nelle produzioni di grande serie, grazie soprattutto alle migliorate caratteristiche metallurgiche degli acciai e al controllo più accurato dei cicli di trattamento termico.

Il problema comunque resta, specialmente là dove si debbano eseguire produzioni non elevatissime e dove il corpo dell'ingranaggio non è simmetrico dal punto di vista geometrico.

Il coltello rasatore è un utensile che "*lavora male*" perché i numerosi spigoli taglienti formati dai canalini, non penetrano nel materiale come è nel caso della fresatura o della tornitura, ma piuttosto raschiano la superficie esattamente come fa un raschietto a mano, e la loro azione è tanto più incisiva quanto maggiore è la pressione con cui il coltello viene spinto contro il pezzo.

Bisogna approfondire un po' questo discorso della pressione che i taglienti esercitano sul fianco del dente dell'ingranaggio.

Il sistema di progettazione comunemente adottato per coltelli rasatori è il cosiddetto "*metodo dei contatti pari*".

Esso consiste nel progettare il coltello rasatore in modo di assicurare, quando è possibile, che i punti di contatto tra coltello e ingranaggio, durante l'accoppiamento, siano sempre in numero pari.

Questa necessità deriva dal presupposto che se il numero di punti di contatto sul fianco destro è uguale a quello del fianco sinistro, si ha un sostanziale equilibrio delle forze e quindi l'asportazione del materiale avviene con più regolarità.

In effetti questa teoria è largamente confermata nella pratica e funziona nella maggior parte dei casi, ma non in tutti.

In primo luogo non è sempre possibile rispettare la regola dei contatti pari, a causa delle caratteristiche geometriche degli ingranaggi, in secondo luogo questa teoria trascura il fatto che la più o meno grande asportazione di materiale non dipende dalla forza con cui il tagliente viene spinto contro la superficie da lavorare, ma dalla pressione che esso esercita. La pressione dipende sia dalla forza che dalla superficie di contatto e, nell'accoppiamento tra i fianchi dell'ingranaggio e del coltello l'area di contatto varia continuamente in funzione della curvatura delle due superfici. A parità di forza applicata, nelle zone in cui l'area di contatto è maggiore la pressione sarà minore e quindi anche l'asportazione sarà minore.

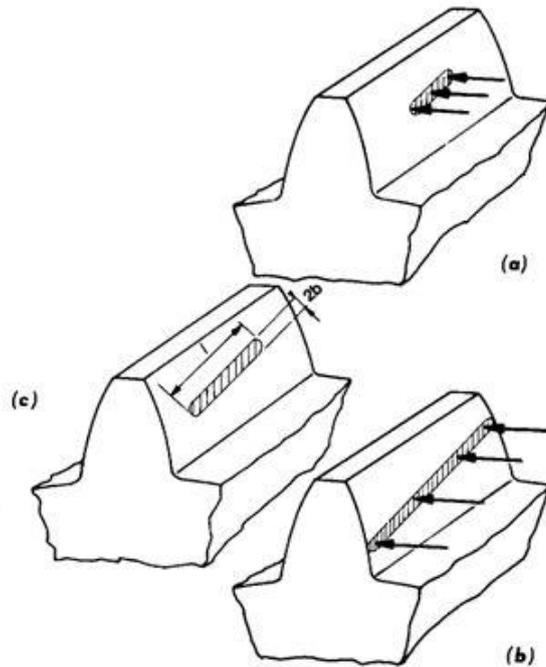


Figura N°1 - Il contatto tra coltello e pezzo avviene su aree più o meno estese

Infine in genere non è possibile che i punti di contatto siano gli stessi, ma pur essendo sempre pari, possono seguire sequenze diverse, ad esempio 4-2-4 oppure 6-4-6.

In questi casi le forze che premono su ogni singola area sono sostanzialmente diverse e quindi diversa sarà l'azione del tagliente sulla superficie.

Si spiegano così i deludenti risultati che si ottengono nella rasatura quando la curvatura dei fianchi dei denti è molto variabile, come nel caso di ingranaggi con pochi denti.

Tutto è poi complicato dal fatto che le effettive velocità di taglio sono variabili sia in valore assoluto che in direzione, lungo il profilo del dente.

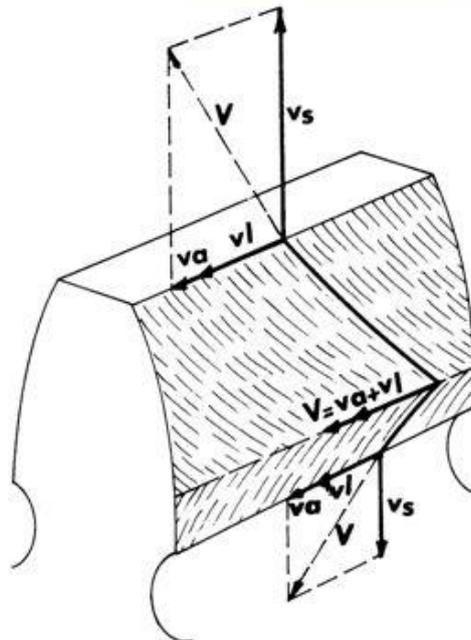


Figura N°2 - Vettori della velocità di taglio in rasatura

Come è noto, la componente assiale della velocità di taglio effettiva dipende dall'angolo di incrocio: maggiore è questo angolo maggiore sarà il valore della componente assiale.

Purtroppo l'angolo di incrocio tra pezzo e coltello in rasatura deve attestarsi intorno ai 12°, perché, per effetto delle grandi forze in gioco, della variabilità dei punti di contatto e da altre caratteristiche dell'operazione, all'aumentare dell'angolo di incrocio si riduce l'azione

di guida del coltello sul pezzo. Per capire ciò bisogna tener presente che in genere il coltello trascina il pezzo.

Nelle macchine rasatrici dell'ultima generazione le rotazioni del pezzo e del coltello sono comandate da due diversi motori e sono tra loro sincronizzate e quindi si attenua un po' il problema, ma non di tanto perché le forze in gioco non riescono ad essere dominate completamente dalla coppia fornita dai motori.

Allo scopo di superare questi problemi, la Sicmat (Pianezza –Torino) ha messo a punto dopo una lunga serie di studi e di sperimentazioni, una macchina che invece del rasatore in acciaio usa un "rasatore" abrasivo.

Questo metodo era già stato sperimentato, ed anche commercializzato, qualche decennio fa, ma era stato subito abbandonato perché i risultati in termini di precisione e di costanza non erano assolutamente soddisfacenti.

Il passo decisivo compiuto dalla Sicmat è stato quello di utilizzare nel processo la sincronizzazione degli assi che ha portato una serie di vantaggi che illustreremo tra breve. Bisogna dire subito che la finitura con la *levigatura esterna* permette asportazioni comparabili a quelle della rasatura, cioè 0,04 – 0,05 mm per fianco, ma anche decisamente superiori, come per esempio 0,10 mm se si deve correggere un forte errore di eccentricità. Tuttavia questo metodo può essere adottato anche solo per una levigatura, cioè una superfinitura, come a volte si fa con l'honing interno.



Figura N°3 - *Levigatura esterna di un ingranaggio con utensile abrasivo*

Il primo problema affrontato è stato quello della velocità di taglio. Infatti le mole abrasive, per essere efficienti, devono lavorare a velocità molto superiori rispetto agli utensili in acciaio rapido. Ed infatti, dove è possibile si arriva a 15 – 20 m/secondo.

Ciò è possibile in primo luogo portando a circa 5000 giri/min la velocità angolare del pezzo (in rasatura è intorno a 600 – 1300 giri/min) , e poi portando l'angolo di incrocio dai 12° della rasatura a 60° nella levigatura, ove le condizioni geometriche del pezzo lo permettano.

In questo modo la componente longitudinale della velocità di taglio, quella dovuta allo strisciamento, aumenta di molto. Si tratta della componente V_l indicata in figura N°2.

La velocità effettiva è maggiore di questa componente, perché bisogna tener conto anche della componente radiale (V_s), ma di questa non bisogna far molto affidamento, perché cambia in continuazione di intensità, diventando nulla in corrispondenza del diametro primitivo di rotolamento.

Il valore della componente longitudinale della velocità di taglio si calcola con la formula:

$$V_l = \omega_1 R_1 \frac{\sin \gamma}{\cos \beta_2}$$

dove :

ω_1 = velocità angolare dell'utensile-mola

R_1 = raggio primitivo dell'utensile-mola

γ = angolo di incrocio

β_2 = angolo dell'elica del pezzo

Si vede immediatamente che l'effetto dell'angolo di incrocio è molto forte.

Come si è detto, le rotazioni dell'utensile e del pezzo sono sincronizzate, con due motori indipendenti gestiti dal controllo numerico. La gestione dei movimenti a queste velocità ha richiesto una delicata e lunga messa a punto della parte elettronica e dei software.

Con queste velocità di rotazione gli avanzamenti sono incredibilmente ridotti, cioè si arriva a 0,1 μm (un decimo di micrometro) al giro pezzo; si parla di avanzamento radiale.

Questo vuol dire che le pressioni tra utensile e pezzo sono ridottissime e questo consente ai motori direct drive incaricati a far ruotare in sincronia l'utensile ed il pezzo di non subire le distorsioni che invece subiscono in rasatura.

Diretta conseguenza di ciò è un miglioramento decisivo dell'errore di eccentricità ed una assenza completa delle vibrazioni.

Normalmente con la rasatura ad assi sincronizzati si ha una correzione dell'errore di eccentricità di circa il 50% di quella presente sul pezzo dentato.

Con l'honing esterno si può arrivare a correggere anche il 90% dell'eccentricità presente sul dentato.

La riduzione drastica delle vibrazioni è anche dovuta all'adozione di una speciale testa porta mola ad alta inerzia (circa 4-5 volte superiore alle normali), e di questo gruppo è già stato richiesto il brevetto.

La rugosità e la *texture* della superficie lavorata dipendono, come è logico, dalla specifica dell'abrasivo che si impiega. In linea di massima si può dire che in condizioni normali si ottiene un $R_a = 0,4 \mu m$. Se si vuole una forte asportazione (es. 0,2 μm per giro pezzo) usando una grana 60 con struttura aperta, la R_a sarà di 1,0 μm , mentre con grana 120 e struttura chiusa si può ottenere una $R_a = 0,2 \mu m$.

Si tenga presente che la rugosità ottenibile in rasatura è di $R_a = 0,5 - 0,6 \mu m$

Un altro grande vantaggio che deriva dalla drastica riduzione delle forze in gioco è l'assenza di flessioni nella lavorazione degli alberati.

Normalmente l'avanzamento è a tuffo, ma l'utensile-mola ha un moto di oscillazione in senso longitudinale di circa $\pm 1,0$ mm.

Naturalmente, per pezzi con larghezza di fascia dentata particolarmente grande si possono adottare i metodi di lavorazione diagonal o parallel.

Un altro importante vantaggio rispetto alla rettifica, sia essa per generazione o di forma, è costituito dal fatto che con la levigatura esterna si possono finire dopo trattamento termico ingranaggi sotto battuta, anche se in questo caso si deve rinunciare agli alti angoli di incrocio e quindi alle alte velocità di taglio.

La macchina per levigatura esterna prodotta dalla Sicmat, che porta il nome di GRONO-250 (che è un quasi acronimo di Grinding-Honing), è destinata agli ingranaggi dell'*automotive*, cioè con moduli che vanno da 1 a 5 mm.

I tempi ciclo si posizionano tra la rasatura e la rettifica, anche se una generalizzazione di questo tipo è abbastanza aleatoria. Per dare un esempio pratico si può dire che un ingranaggio di $m = 2,5$ mm e con $Z = 43$ ha un tempo di contatto pezzo-utensile di circa

30 - 35 secondi. Quindi per ingranaggi di questo tipo il tempo è minore rispetto alla rettifica di forma.

La diamantatura avviene direttamente in macchina con l'ausilio di un rullo diamantato che ha le stesse caratteristiche dell'ingranaggio da lavorare.

Esso infatti prende il posto del pezzo e viene accostato alla mola simulando un ciclo di lavorazione (figura N°4)

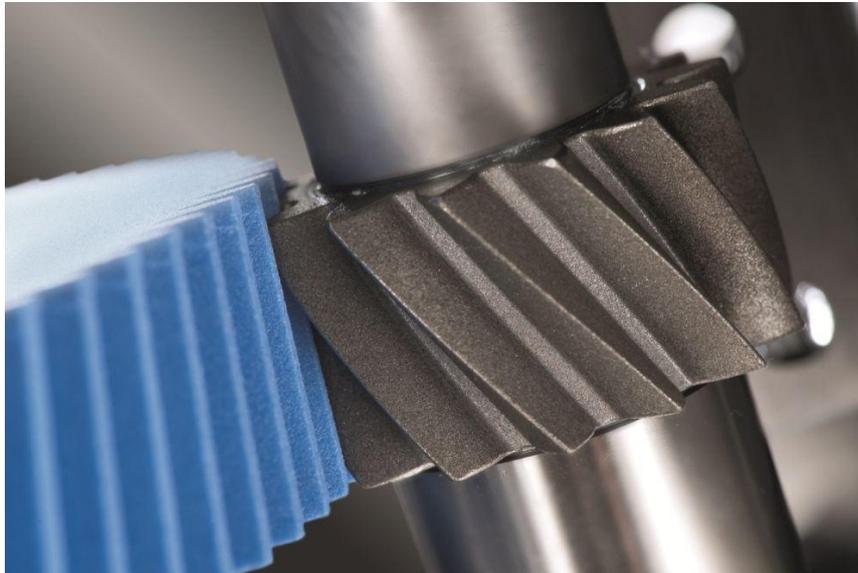


Figura N°4 Rullo diamantato per ravvivatura dell'utensile levigatore

L'utensile mola, può essere preparato direttamente in macchina, partendo da una mola a disco cilindrica di spessore adeguato.

La sgrossatura dei denti viene eseguita tramite disco diamantato biconico avente angolo di pressione di 15°. Con quest'unico utensile, grazie ad un opportuno software, si possono ottenere sulle mole tutti i moduli, angoli di pressione e numero denti voluti.

Il disco biconico viene montato al posto del pezzo (ad asse verticale) e la mola da sagomare sul mandrino portamola. Questo, muovendosi sia in senso assiale sia con moto di generazione (cioè rototraslando sul cerchio primitivo), permette al disco biconico di generare i vani ad evolvente. Essi verranno poi rifiniti, in quanto a precisione e correzioni topologiche, tramite il rullo dentato diamantato come sopra descritto. Il tutto richiede solo qualche ora a fronte delle settimane richieste per ottenere dal mercato mole sgrossate con la dentatura voluta.

Sostituendo al disco biconico uno a profilo semicircolare è anche possibile dare alla mola la forma di un singolo vano dente ed usare così la macchina come rettifica di forma dente a dente: prestazione preziosa per eseguire piccole serie o prototipi.

Riepilogando, i vantaggi che si hanno nell'honing esterno sono:

- *Finitura dopo il trattamento termico*
- *Minori asportazioni rispetto la rettifica lasciando quindi più materiale carbo-nitrurato sulla superficie del dente*
- *Migliore texture superficiale rispetto la rettifica di forma, senza necessità di adottare software particolari*
- *Possibilità di lavorare ingranaggi sotto spallamento*
- *Minori tempi di finitura, specie rispetto la rettifica di forma*
- *Possibilità di lavorare in diagonal, cosa non possibile con l'honing interno*
- *Assenza di flessioni sugli alberi*
- *Minori sforzi e vibrazioni con un minor logorio della macchina.*

Le principali caratteristiche tecniche della macchina Sicmat mod. Grono 250 sono

Caratteristica	
-----------------------	--

Minimo e massimo modulo	mm	1 - 5
Minimo e massimo diametro del pezzo (Ingranaggio)	mm	18 - 250
Minimo e massimo diametro del pezzo (su alberi)	mm	18 - 130
Massima larghezza della fascia che può essere levigata	mm	200
Massima lunghezza tra i centri	mm	600
Asportazione standard per ogni fianco	mm	0,06
Angolo di incrocio	gradi	± 90
Massimo diametro dell'utensile abrasivo	mm	350
Tempo di lavoro (ingranaggio $Z=47$; $m=2,3$)	secondi/dente	$\leq 0,75$

Un'altra osservazione importante è che con la disposizione del pezzo con asse verticale risulta facilitata l'applicazioni di sistemi di carico e scarico del pezzo in automatico. Il controllo numerico è il collaudato Siemens Sinumerik 840 D che permette la gestione di tutti gli assi di cui la macchina è dotata.

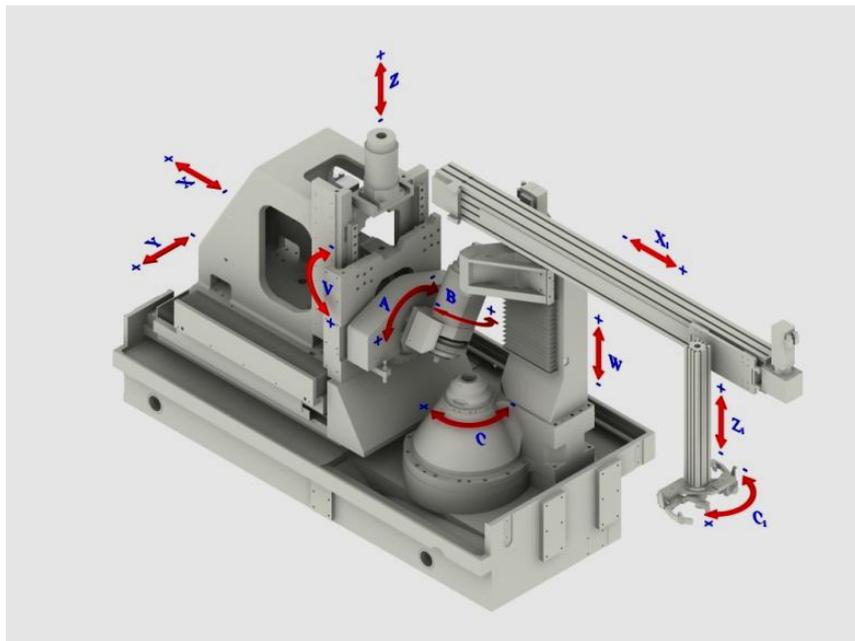


Figura N°5 Schema assi della levigatrice GRONO 250

Come si può osservare dallo schema di figura N°5 tutti i movimenti sia relativi alla lavorazione vera e propria , sia quelli di piazzamenti che quelli del carico e scarico sono comandati dal controllo numerico che rende la macchina facile da usare, flessibile e affidabile.

Naturalmente, come tutte le macchine finitrici di ultima generazione, è dotata di una stazione di controllo del pezzo in entrata, che impedisce la lavorazione di ingranaggi con soprametalli abnormi o comunque con gravi difetti strutturali che possono causare danni all'utensile o alla macchina stessa.