

La rettifica di forma

Vengono qui esposti gli elementi basilari della rettifica di forma mettendo in evidenza i vantaggi e gli svantaggi rispetto alla rettifica per generazione e fornendo i dati relativi alle caratteristiche di lavoro in funzione delle mole impiegate.

L'operazione di rettifica dei fianchi dei denti degli ingranaggi può essere divisa in due grandi categorie in relazione a come è ottenuto il profilo dei fianchi: *la rettifica per generazione e la rettifica di forma*.

Il metodo per generazione può essere spiegato con il modello usuale dell'ingranaggio che rotola sulla cremagliera. Se non ci sono spostamenti di profilo, il cerchio primitivo dell'ingranaggio si coniuga con la retta primitiva della cremagliera.

I movimenti di taglio e di traslazione longitudinale si sovrappongono ai movimenti di generazione.

In tutti i sistemi di questa categoria il fianco del dente dell'ingranaggio è formato dal processo di generazione e ciò che caratterizza il processo è che la mola non ha una forma specifica per ogni tipo di ingranaggio.

Per esempio, una mola a disco o biconica può essere usata per ingranaggi con differenti moduli, diverso numero di denti e diverso angolo di pressione assiale, cioè diverso angolo di elica.

Nella rettifica di forma, invece, il profilo della mola corrisponde alla forma del vano tra due fianchi consecutivi dei denti; in pratica è richiesta una mola specifica per ogni ingranaggio.

Diverso modulo, un numero di denti diverso, diverso spostamento di profilo richiedono mole con profilo diverso. A loro volta i due metodi di rettifica si suddividono in altri specifici sistemi, in relazione al numero ed al tipo di mole utilizzati.

Nella figura N°1, tratta dal libro "Moderne Zahnradfertigung" del Dr. Thomas Bausch, sono illustrati sistematicamente i vari processi di rettifica secondo la forma, il numero ed il posizionamento della mola.

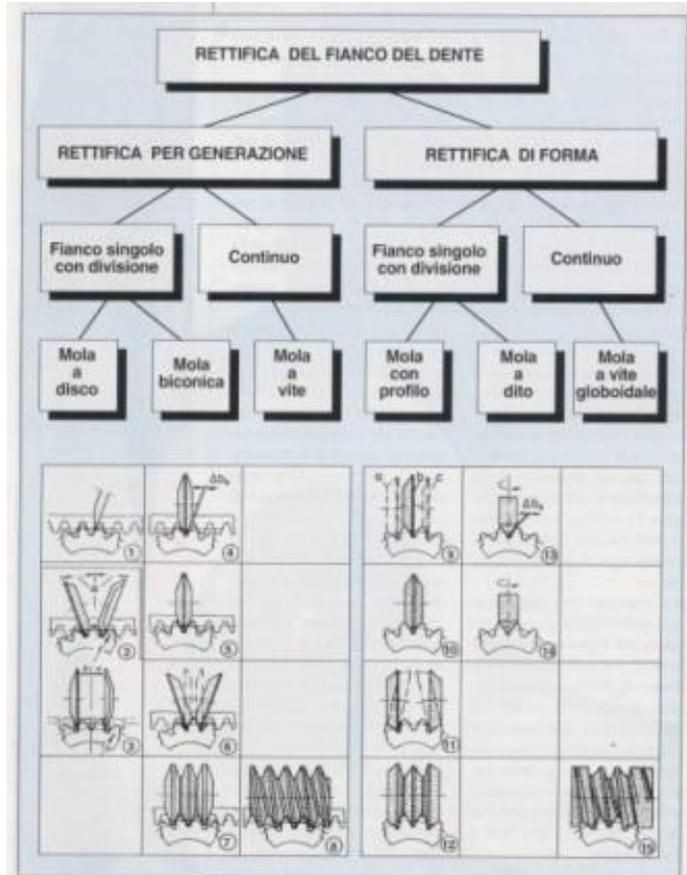


Figura N°1- Riepilogo dei vari sistemi di rettifica degli ingranaggi

Tra i vari metodi di rettifica di forma si parlerà qui di quello con mola a disco singola, come schematizzato nella figura N°1 (10).

Nelle macchine che lavorano con questa tecnica, si usano mole che hanno il profilo uguale o, meglio, circa uguale, al vano tra due denti da rettificare.

Infatti il profilo della mola a volte deve essere leggermente modificato rispetto al teorico per compensare gli errori dovuti dall'interferenza tra la mola ed i denti dell'ingranaggio.

Ciò accade quando si debbano rettificare ingranaggi con forte angolo di elica con mole di diametro non molto piccolo.

La mola può essere sagomata per lavorare anche il fondo del vano oppure, se si rinuncia a questa possibilità, si rettifica solo fino un po' al disotto dell'inizio del profilo attivo. (Figura N°2).

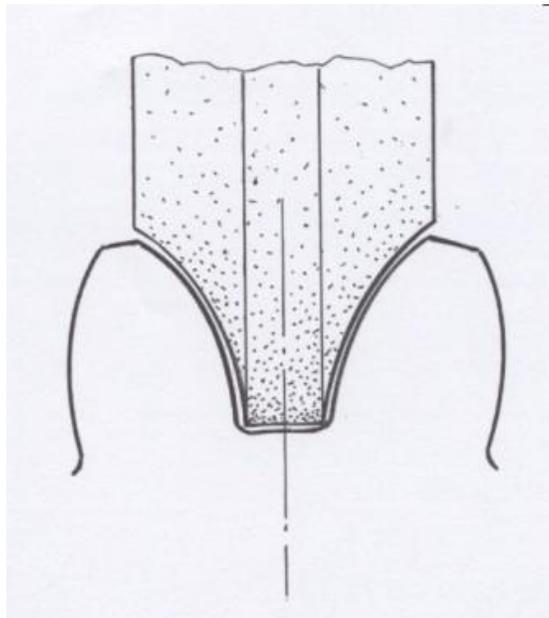


Figura N°2- Schema di lavorazione con mola di forma

La larghezza della mola deve essere, ovviamente, maggiore della larghezza massima del vano del dente.

Si tratta di un metodo di rettifica discontinuo, nel senso che dopo aver finito un vano, si divide e si passa a rettificare un vano contiguo.

Il diametro delle mole di forma può essere estremamente variabile: può andare dai 35 – 40 mm fino a oltre 250 mm e naturalmente il materiale abrasivo può essere del tipo ceramico o CBN.

Questo metodo si presta bene anche alla rettifica di ingranaggi interni, grazie alla possibilità di usare mole di piccolo diametro, ma con mole di piccolo diametro è possibile rettificare anche ingranaggi vicini a spallamenti od ad altri ingranaggi.

Questo è uno dei grandi vantaggi della rettifica con il metodo di forma.

Poiché la mola si può sagomare con qualsiasi profilo, con questo metodo si possono rettificare anche alberi scanalati di vario tipo ed ogni altro profilo che si ripeta regolarmente e non su una circonferenza.

Si capisce subito che una delle caratteristiche principali della rettifica di forma è la grande flessibilità, non solo perché si possono rettificare profili di vario tipo, anche quelli non ottenibili per generazione, ma anche perché si possono modificare molto facilmente, e con costi praticamente nulli, i profili dei denti da rettificare.

E' abbastanza frequente il caso di modifiche del profilo per ottimizzare l'accoppiamento con la controruota, oppure la ricerca del profilo più silenzioso nella costruzione di prototipi, ebbene, con una rettifica di forma ciò si può fare con molta semplicità.

Si è già accennato al fatto che la mola di forma può essere sagomata in modo da rettificare anche il fondo del dente o rettificare poco più sotto del profilo attivo.

Nella rettifica per generazione la rettifica del fondo dente risulta, il più delle volte, problematica e quindi in genere si ottiene un dente che è rettificato solo in parte e che presenta, perciò, una zona di discontinuità che, nei casi più gravi è delimitata da uno scalino, come è illustrato schematicamente nella figura N°3.

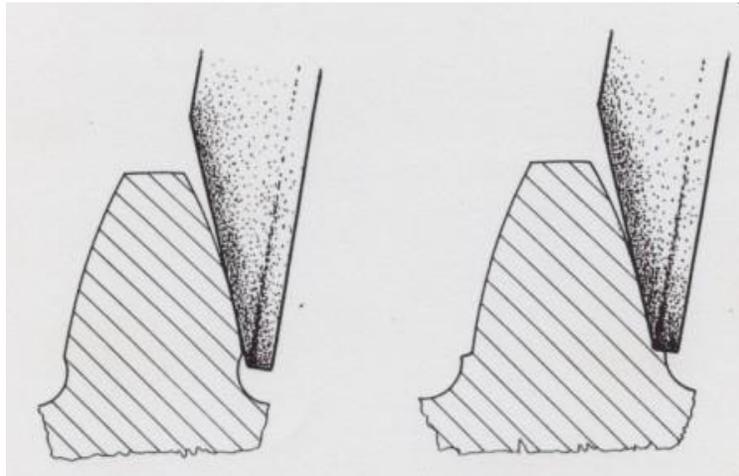


Figura N°3- *Indicazione schematica della rettifica incompleta del vano dente*

I gradini di rettifica indeboliscono il dente: la perdita di capacità di carico può andare da un 10 – 15% fino ad oltre il 60% (Giovanni Castellani – Daniele Rosa: *Organi di Trasmissione*, luglio 2004).

Tutto ciò si traduce in un altro non indifferente vantaggio della rettifica di forma rispetto a quella per generazione.

Con la rettifica di forma si possono ottenere precisioni elevatissime grazie soprattutto alla precisione dei movimenti degli assi gestiti dai Controlli Numerici dell'ultima generazione.

Ora si rettificano ingranaggi master di classe DIN 2 senza particolari problemi e, nelle produzioni normali si arriva con facilità alla classe DIN 4.

Le mole nella rettifica di forma

Uno dei maggiori vantaggi della rettifica di forma è la possibilità di un'ampia scelta dei tipi di mole impiegabili in funzione delle caratteristiche degli ingranaggi da rettificare e dal tipo di produzione.

La prima scelta possibile è quella del tipo di abrasivo che può essere l'ossido di alluminio (Al_2O_3), cioè quello che forma le mole cosiddette ceramiche, oppure può essere il Nitrato Cubico di Boro, cioè l'abrasivo universalmente conosciuto come CBN.

Questo abrasivo, secondo come durezza solo al diamante, viene fissato con deposizione elettrolitica su un corpo in acciaio utilizzando un legante che in genere è il nichel.

Le mole in ceramica sono facilmente diamantabili e quindi il loro profilo può essere modificato con relativa facilità, sono economiche e facilmente reperibili sul mercato nelle varie specifiche adatte ad ogni tipo di lavorazione.

Esse sono quindi preferibili nei casi in cui la produzione è costituita da piccoli lotti oppure dove si devono eseguire dei prototipi o dove è necessario apportare frequenti modifiche del profilo.

Le mole di questo tipo però devono essere diamantate dopo un certo numero di metri di dentatura eseguita e questo comporta in primo luogo un aumento del tempo ciclo ed in secondo luogo un aumento dei costi per l'uso dei diamanti o dei rulli diamantati di ravnatura.

Oggi nella rettifica degli ingranaggi vengono usate delle mole in ossido d'alluminio con una struttura microcristallina controllata e con durezza superiore a tutti gli altri ossidi d'alluminio. Questo tipo di abrasivo è conosciuto anche con la sigla SG (*Seeded Ge*) della Norton.

La caratteristica principale di questo materiale è che i suoi grani sono costituiti da microcristalli che durante l'impiego consentono la frattura del grano in modo che gli spigoli taglienti si rinnovino continuamente.

Le mole in CBN (elettrodeposte) hanno invece un profilo fissato in fase di costruzione che non può essere modificato, non necessita di rinvivatura e quindi si ha un vantaggio sul tempo ciclo; possono lavorare con velocità di taglio e con avanzamenti superiori e perciò permettono una maggiore produttività e costanza delle caratteristiche geometriche dell'ingranaggio prodotto. Sono quindi più indicate nelle produzioni di grandi serie.

Lo svantaggio di queste mole è il loro costo ed il fatto che quando non tagliano più devono essere inviate al costruttore che provvederà a togliere, con mezzi chimici, lo strato di abrasivo e di ridepositarlo riproducendo il profilo originale.

Esiste anche un tipo di mola in CBN diamantabile. Si tratta di una mola che ha i grani in CBN tenuti insieme da un legante di tipo ceramico.

Queste mole possono essere considerate una via di mezzo tra quelle ceramiche e quelle in CBN elettrodeposte.

Il loro costo è molto elevato ma, in alcuni casi, il loro impiego risulta conveniente.

La grande flessibilità della rettifica di forma si manifesta anche, come si è già accennato, nella scelta del diametro della mola che può andare da circa 35 – 40 mm ad oltre 250 mm.

Specialmente la possibilità di usare mole di piccolo diametro consente di rettificare ingranaggi molto vicini a spallamenti o ad altri ostacoli, come si può vedere nella figura N°4, oppure rettificare ingranaggi interni (figura N°5).

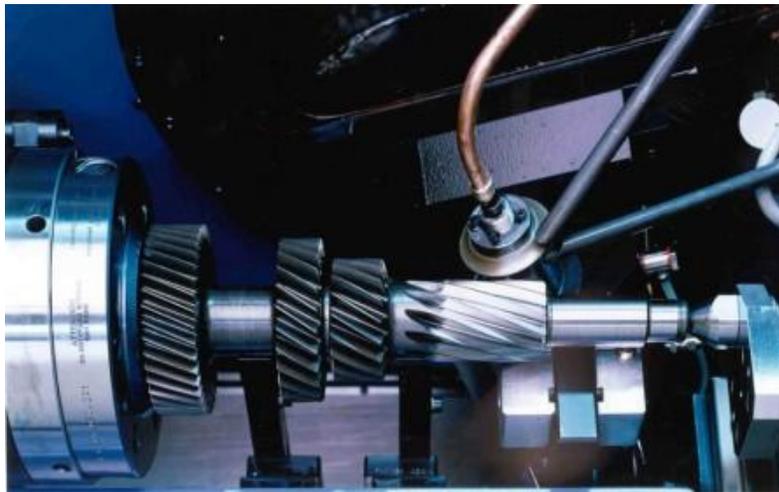


Figura N°4 (Rettifica di un ingranaggio sotto-battuta con mola di piccolo diametro)

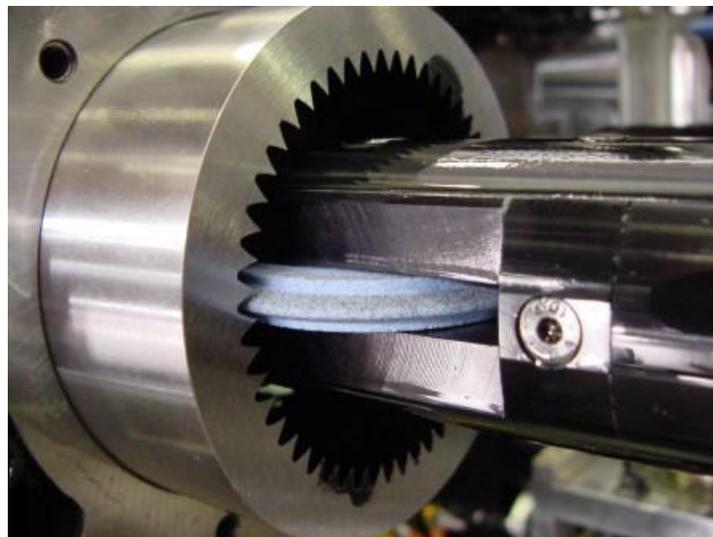


Figura N°5 – (Rettifica di un ingranaggio interno con mola di forma in ceramica)

Poiché la durata delle mole, cioè i metri di dentatura eseguibili per ogni rattivatura, dipende prevalentemente dal diametro della mola, cioè dalla lunghezza della sua circonferenza e quindi della quantità di abrasivo interessato al taglio, se si devono rettificare ingranaggi con molti denti e con fascia molto larga, è necessario usare mole di diametro maggiore.

Per gli impieghi normali, cioè nella rettifica di ingranaggi con una lunghezza totale dei denti compresa da 1 a 3 metri, si preferiscono mole di diametro di circa 150 – 170 mm e, per il CBN, anche meno.

Bisogna notare che un diametro minore facilita l'azione di refrigerazione e di pulizia da parte dell'olio da taglio.

Infatti, come si può vedere nella figura N°6, una mola di grande diametro riduce lo spazio tra mola e pezzo, impedendo al refrigerante di arrivare copioso in prossimità della zona di contatto.

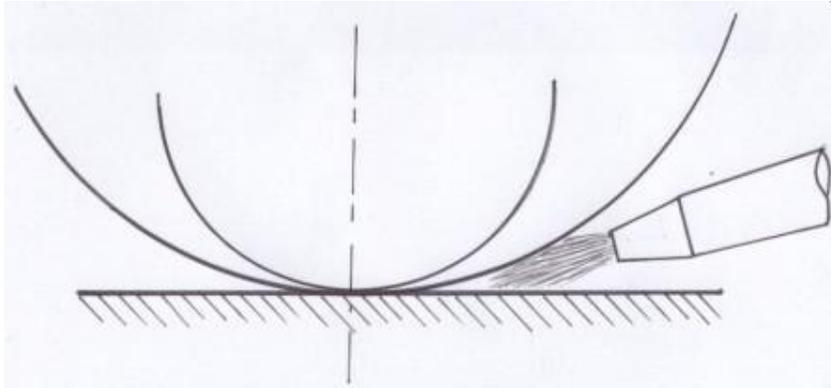


Figura N°6- Con mole di piccolo diametro la refrigerazione è più efficace

Nei casi limite ciò può provocare anche pericolosi surriscaldamenti locali con modifica delle caratteristiche strutturali dell'acciaio.

Con la mola di diametro minore, l'azione dell'olio refrigerante è più efficace ed i rischi sono minori.

Condizioni di lavoro

I fattori principali che influenzano le condizioni di lavoro sono:

- *il tipo di abrasivo utilizzato;*
- *le dimensioni della mola;*
- *il grado di precisione richiesto;*
- *il tipo di materiale lavorato;*
- *il soprametallo da asportare.*

Le condizioni di lavoro che è necessario esaminare sono: la velocità di taglio, la velocità d'avanzamento, il numero di passate e l'intervallo di diamantatura, cioè la durata della mola.

Bisogna necessariamente parlare separatamente del caso di mole in ceramica e di quello delle mole in CBN.

Mole in ossido d'alluminio

Con le mole in ceramica a struttura microcristallina, la velocità di taglio può raggiungere anche i 60 m/sec nella lavorazione dell'acciaio. In sgrossatura è però opportuno ridurre questo limite a circa 30 - 40 m/sec.

Il pericolo sempre in agguato nella rettifica di forma è costituito dai surriscaldamenti localizzati sulla superficie del dente. A questo proposito bisogna osservare che le condizioni di taglio non sono uguali per tutta l'estensione del fianco del dente. Anche se il soprametallo è costante, cioè ha uno stesso spessore in ogni punto del dente, durante il processo d'asportazione la zona del dente in prossimità del diametro interno è molto più svantaggiata in quanto l'asportazione del soprametallo viene eseguita da una piccola

porzione della mola, vicino al suo diametro esterno. La mola in questo punto è molto sollecitata, si usura maggiormente e tende a surriscaldare il pezzo.

L'avanzamento assiale dipende essenzialmente dalla fase della lavorazione e dal soprametallo da asportare.

Si può dire che per un ciclo di lavoro che preveda due passate: una di sgrossatura ed una di finitura, con un'asportazione per ogni fianco rispettivamente di 0,10 mm e 0,025 mm si possono adottare i seguenti avanzamenti:

- *sgrossatura: 1000 – 1500 mm/min*
- *finitura: 2000 – 3000 mm/min.*

Con questi valori, validi per mole del tipo SG, si possono ottenere precisioni della classe DIN 4 - 5 lavorando ingranaggi di modulo da 1 a 3 mm.

Naturalmente questi valori dell'avanzamento assiale sono validi solo se la scelta delle caratteristiche della mola, specialmente della dimensione del grano e della struttura, è corretta.

Per esempio le specifiche raccomandate dalla Winterthur per la rettifica di forma sono quelle indicate nella tabella seguente.

<i>Tipo di abrasivo</i>	<i>Modulo</i>	<i>Sgrossatura</i>	<i>Finitura</i>	<i>Superfinitura</i>
<i>convenzionale</i>	<i>da 1 a 3 mm</i>	<i>53A46H15VPMF</i>	<i>53A80H15VPMF</i> <i>42A80H15VPMF40W</i>	<i>27A80H15VPMF</i>
	<i>da 3 a 6 mm</i>		<i>53A60H15VPMF</i> <i>42A60H15VPMF40W</i>	
<i>microcristallino</i>	<i>da 1 a 3 mm</i>	<i>85A46H9V601W</i>	<i>85S120H15VP601W</i>	
	<i>da 3 a 5 mm</i>		<i>85S80H15VP601W</i>	
	<i>da 5 a 12 mm</i>		<i>85A60H15VP601W</i>	

Il numero di passate dipende in gran parte dal soprametallo da asportare. Per i moduli fino a 3 mm è normale un soprametallo di 0,10 – 0,12 mm per fianco ed in questo caso generalmente sono sufficienti una passata di sgrossatura ed una di finitura.

E' frequente anche il caso di un ciclo con una passata di sgrossatura, una di prefinitura ed una di finitura, specie dove l'ingranaggio prima della rettifica presenti delle notevoli distorsioni dovute al trattamento termico, oppure dove sia richiesta una grande precisione o una accurata finitura superficiale.

Il rendimento di una mola per la lavorazione degli ingranaggi, viene misurato con il numero di metri di dentatura totali eseguibili.

Infatti, ha poco senso parlare di numero di pezzi eseguiti in totale, perché un ingranaggio può avere pochi o molti denti ed una fascia più o meno larga.

La lunghezza totale dei denti di un ingranaggio è data dal prodotto del numero di denti per la larghezza della fascia dentata, diviso poi per il coseno dell'angolo dell'elica nel caso di ingranaggi elicoidali.

Il rendimento totale di una mola in Al_2O_3 dipende principalmente dalla possibilità di sfruttamento, cioè dalla differenza tra il diametro iniziale e quello finale della mola. Questo valore determina il numero di rinvivature possibili.

I metri di dentatura eseguibili per ogni rinvivatura dipendono anche dalle condizioni di lavoro e dalla precisione voluta.

Una mola di forma di diametro di 150 mm che fa un ciclo di sgrossatura e finitura, su un ingranaggio di classe DIN 4 – 5 per ogni rinvivatura può eseguire mediamente 2 - 3 metri di dentatura.

Bisogna notare che se la mola ha un diametro maggiore esegue più metri, circa in proporzione alla maggior lunghezza della circonferenza e viceversa.

Questo però è solo un dato teorico perché in pratica le rinvivature si fanno alla fine di uno o più cicli di rettifica, non è opportuno diamantare a metà di un ciclo.

Per ogni ravnatura viene asportato un soprametallo di circa $S = 0,015$ mm in senso ortogonale al profilo in prossimità del diametro primitivo (vedere figura N°7) a cui corrisponde una certa riduzione di diametro ΔD calcolabile con le seguenti formule.

$$\Delta R = \frac{S}{\sin \alpha} \quad \text{e quindi} \quad \Delta D = 2 \cdot \Delta R = \frac{2 \cdot S}{\sin \alpha}$$

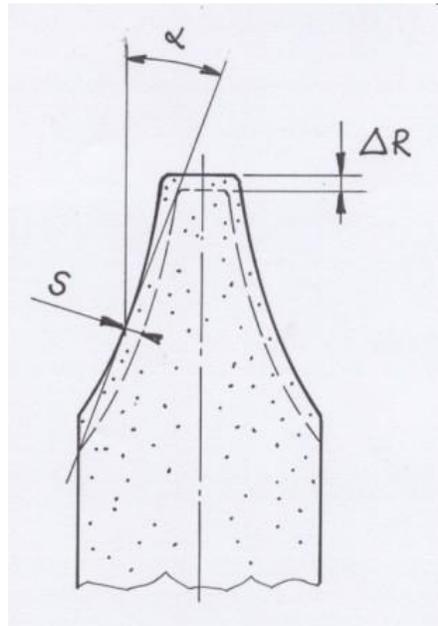


Figura N°7 - Riduzione del diametro esterno in diamantatura

Per esempio: con $\alpha = 15^\circ$ e $S=0,015$ si ha una riduzione di diametro per ogni ravnatura di circa 0,12 mm. Conoscendo di quanto si può ridurre il diametro della mola da inizio a fine vita, è immediato il calcolo delle ravnature possibili e quindi del numero di metri di dentatura eseguibili in totale.

La diamantatura delle mole in Al_2O_3 può essere fatta o con una coppia di diamanti a punta singola oppure con un rullo diamantato rotante come schematizzato nella figura N°8. La precisione del profilo dipende in questo caso dalla precisione dei movimenti gestiti dal controllo numerico della macchina ed in misura importante anche dallo stato di usura dei diamanti e dei rulli.

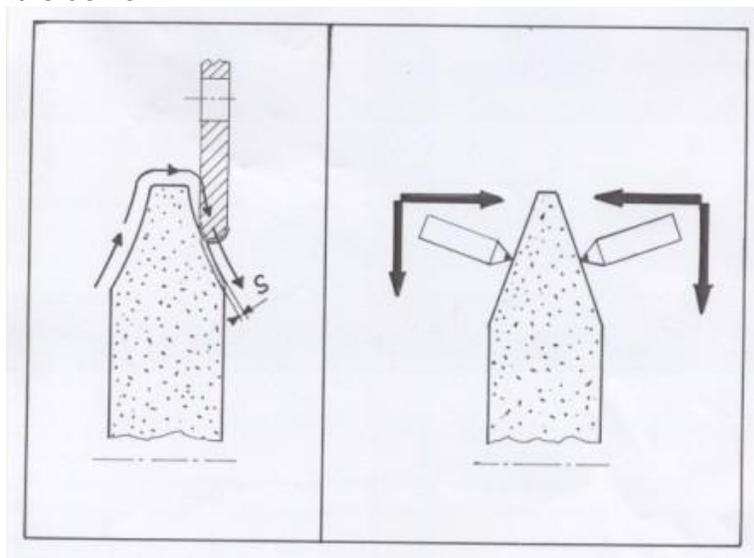


Figura N°8- Schema di diamantatura di mole singole o di forma

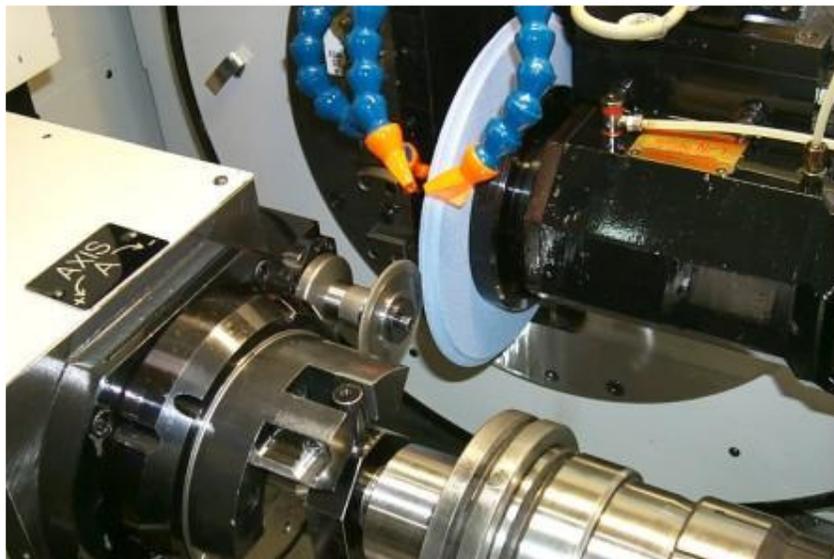


Figura N°8° - Esempio di diamantatura di una mola ceramica con rullo diamantato

In alcuni casi, per economizzare nel tempo di ravvittura si possono impiegare dei rulli diamantati profilati come il vano da eseguire. Essi vengono fatti avanzare in senso radiale contro la mola eseguendo l'operazione in pochi secondi.

Mole in CBN elettrodeposto

Come si è già detto questo tipo di mole si impiegano nella produzione di grande serie dove è prioritaria la riduzione del tempo di rettifica.

I vantaggi del CBN sono:

- *maggior capacità di asportazione e quindi minori tempi e minori probabilità di surriscaldamenti locali anche a motivo delle maggiori velocità di taglio;*
- *maggior costanza geometrica degli ingranaggi prodotti;*
- *non sono necessarie le ravviture e quindi si risparmia in tempo e nei costi di diamanti o rulli diamantati;*
- *relativamente lunghe durate anche con diametri piccoli: In certi casi l'uso del CBN è praticamente il solo possibile, come per esempio nelle rettifiche di ingranaggi interni o ingranaggi sotto battuta;*
- *migliori proprietà strutturali della superficie rettificata con CBN rispetto a quella rettificata con mole in ceramica (taglio freddo).*
- *minor tempo per il set-up della macchina quando si cambia lavorazione.*



Figura N°9- Mole di forma in CBN elettrodeposto di diversi diametri

La velocità di taglio può arrivare anche oltre i 60 m/sec mentre gli avanzamenti possono essere: in sgrossatura intorno a 2000 mm/min ed in finitura circa 3000 – 3500 mm/min.

Nelle macchine moderne è possibile montare due mole con specifiche diverse, una adatta alla fase di sgrossatura, con grana più grossa ed una per la finitura con grana più fine.

La durata delle mole di forma in CBN dipende, come sempre, da innumerevoli fattori ma, in maniera preponderante, è circa proporzionale al diametro della mola.

Se una mola in CBN presenta degli errori di eccentricità o di planarità, la sua vita risulterà drasticamente ridotta. Infatti in questo caso il contatto della mola sul pezzo avviene sempre su un limitato settore che si userà molto velocemente.

Il corpo della mola viene rettificato con tolleranze molto strette, dell'ordine del micrometro. Dopo la deposizione galvanica del CBN le mole sono sottoposte ad una speciale operazione di ripassatura detta "*touch dressing*" per livellare la sporgenza dei grani migliorando l'asportazione e la rugosità sulla superficie rettificata.

Nella tabella seguente sono indicati i metri di dentatura rettificabili mediamente con una mola, in funzione del diametro esterno.

Diametro mola (mm)	Metri di dentatura eseguibili	
	minimo	massimo
40	200	250
80	400	500
100	500	600
120	600	700
150	800	1000
180	1100	1300

La mola, quando non taglia più, cioè quando tende a surriscaldare il pezzo, oppure produce degli errori di profilo o la rugosità troppo alta, deve essere inviata dal costruttore per la rigenerazione. L'abrasivo ed il legante vengono tolti in un bagno chimico e viene deposto un nuovo strato di CBN. A questo punto la mola è da considerarsi come nuova.

Modifiche dell'elica

Con la rettifica di forma è possibile ottenere delle correzioni di elica, cavità o bombature, coordinando i vari assi CN.

Nell'ipotesi di correzioni che rientrino nella norma, cioè 10 15 micron sull'elica, si possono coordinare gli assi X e Y, cioè si allontana o si avvicina la mola in senso radiale durante la sua traslazione (vedere figura N°10).

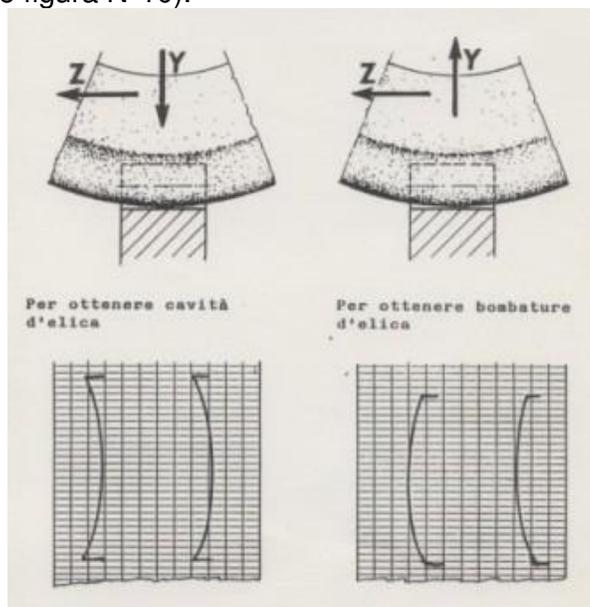


Figura N°10- Indicazione schematica della modifica dell'elica

Se invece la correzione di elica è molto grande, si può lavorare un fianco alla volta coordinando gli assi Z e X, cioè assegnando una rotazione supplementare al pezzo durante la traslazione assiale.

Esempio di lavorazione

Come esempio di lavorazione si propone una applicazione un po' particolare: la rettifica di un ingranaggio di modulo relativamente grande ($m=7,35$ mm) in cui si eseguono due passate di sgrossatura con due mole di forma in CBN elettrodeposto che lavorano contemporaneamente due vani contigui ed una passata di finitura con una sola mola in CBN, con grana più fine.

Da notare il soprametallo totale da asportare che è di 0,25 mm per fianco ed anche la fascia dentata relativamente ampia: 110 mm.

L'operazione è eseguita sulla rettifica Samputensili Mod. S400GT .



Figura N°11- Esempio di rettifica di un ingranaggio con mole di forma in CBN

Dati ingranaggio		
<i>Modulo</i>	<i>mm</i>	<i>7,35</i>
<i>Numero di denti</i>		<i>30</i>
<i>Angolo di pressione</i>		<i>20 ° 30'</i>
<i>Angolo di elica</i>		<i>0 °</i>
<i>Diametro esterno</i>	<i>mm</i>	<i>252</i>
<i>Larghezza fascia dentata</i>	<i>mm</i>	<i>110</i>
<i>Durezza</i>	<i>HRC</i>	<i>58 - 62</i>

Caratteristiche delle mole e condizioni di lavoro		
	<i>Sgrossatura</i>	<i>Finitura</i>
<i>Costruttore</i>	<i>Samputensili</i>	<i>Samputensili</i>
<i>Tipo di abrasivo</i>	<i>CBN elettrodeposto</i>	<i>CBN elettrodeposto</i>
<i>Diametro</i> <i>mm</i>	<i>175</i>	<i>175</i>
<i>Dimensione del grano</i>	<i>B181</i>	<i>B91</i>
<i>Velocità di taglio</i> <i>m/sec</i>	<i>35</i>	<i>40</i>
<i>Soprametallo per fianco</i> <i>mm</i>	<i>0,18</i>	<i>0,07</i>
<i>N° di passate (andata e ritorno)</i>	<i>2</i>	<i>1</i>
<i>Avanzamento assiale</i> <i>mm/min</i>	<i>1500</i>	<i>3000</i>
<i>Tempo ciclo</i> <i>min</i>	<i>9,25</i>	
<i>Precisione ottenuta</i>	<i>DIN 5</i>	

Conclusione

Si può concludere con la seguente tabella in cui sono messi a confronto i due metodi principali di rettifica: quello di forma e quello per generazione continua con mola a vite. Quelli riportati sono giudizi di carattere generale, che possono anche non valere in qualche caso specifico.

La tipologia degli ingranaggi è talmente vasta che non è possibile applicare un giudizio di un metodo alla totalità dei casi esistenti.

D'altra parte lo scopo di ciò che è stato scritto non è quello di indicare ciò che è meglio per ogni singola lavorazione, ma di dare un'idea di carattere generale del metodo di rettifica di forma.

Caratteristica	Rettifica di forma	Rettifica per generazione continua
<i>Precisione geometrica</i>	+	-
<i>Stato della superficie</i>	-	+
<i>Tempo di rettifica per ingranaggi con $Z \leq 15$</i>	+	-
<i>Tempo di rettifica per ingranaggi con $Z \geq 15$</i>	-	+
<i>Rettifica di ingranaggi con grande modulo</i>	+	-
<i>Semplicità di modifica del profilo della mola</i>	+	-
<i>Possibilità di impiego mole di piccolo diametro</i>	+	-
<i>Possibilità di rettifica di ingranaggi interni</i>	+	-
<i>Possibilità di uso delle stesse mole per Z diverso</i>	-	+
<i>Costo mola e utensili di diamantatura</i>	+	-
<i>Possibilità di rettifica di profili non ad evolvente</i>	+	-
<i>Facilità di rettifica a fondo dente</i>	+	-

+ = Migliore - = Peggior

(Documentazione fotografica fornita dalla Samputensili SpA-Bologna)