

Le mole per la rettifica degli ingranaggi

Qui vengono illustrati i vari tipi di mole impiegate nei diversi sistemi di rettifica degli ingranaggi. Vengono passate in rassegna le caratteristiche geometriche e le caratteristiche fisiche dei tipi di mole maggiormente usate, indicando anche approssimativamente le possibili durate in funzione del tipo di mola, del tipo di abrasivo e dell'operazione eseguita.

L'operazione di rettifica degli ingranaggi si sta affermando sempre di più come metodo principale per la finitura dei denti.

Già da alcuni anni sta sostituendo gradualmente la rasatura, specie su ingranaggi destinati alle trasmissioni di potenze elevate, cioè quelle montate sui veicoli industriali, trattori e macchine per movimento terra.

In questo tipo di trasmissioni si usano ingranaggi con modulo medio-grande, 3-8 mm, quindi con diametri relativamente elevati e spesso con forme complesse.

Le deformazioni dovute al trattamento termico sono perciò elevate e, se si vogliono trasmissioni di alta qualità, è praticamente obbligatorio rettificare i denti.

Se si escludono dal discorso i processi di levigatura interna ed esterna, cioè il processo conosciuto come *honing*, si possono dividere i metodi di rettifica in tre categorie;

- *rettifica con metodo a generazione discontinua;*
- *rettifica con metodo di generazione continua;*
- *rettifica con metodo di forma.*

Ognuno di questi sistemi di rettifica usa un diverso tipo di mola abrasiva.

Per la rettifica con il metodo di generazione discontinua si usano una o due mole sagomate con fianchi rettilinei in ceramica o in CBN.

Con il metodo di generazione continua si usano mole a vite ed anche in questo caso si possono scegliere diversi tipi di abrasivo, incluso il CBN.

Infine nella rettifica di forma si usano mole a disco profilate come il vano della dentatura, salvo le modifiche necessarie per correggere le interferenze.

La scelta dell'abrasivo in questo ultimo tipo mola è ancora più ampia che nei precedenti tipi. L'illustrazione delle mole per la rettifica degli ingranaggi quindi deve prevedere un esame delle caratteristiche geometriche ed un'analisi delle caratteristiche fisiche, cioè dell'abrasivo usato in funzione del risultato che si vuole ottenere.

Caratteristiche geometriche delle mole

- Generazione discontinua

Le mole sono sostanzialmente dei dischi con profilo biconico, nel caso di rettifica di un fianco alla volta o di due fianchi contemporaneamente, oppure sono mole a tazza così come riepilogato nella figura N°1.

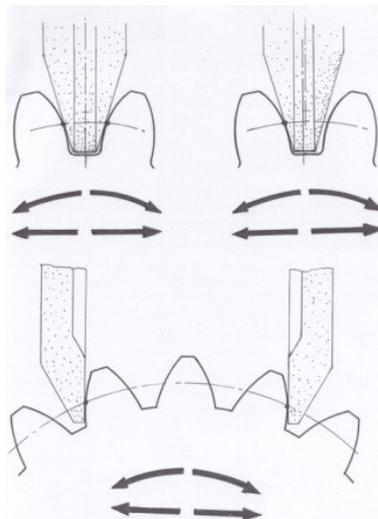


Figura N°1-Schema di rettifica per generazione su un fianco, su due fianchi e metodo Maag

Nei primi due metodi le mole hanno un profilo con fianchi rettilinei con inclinazione uguale all'angolo di pressione di funzionamento.

In genere questo angolo è uguale all'angolo di pressione nominale se si adotta come diametro di generazione (rotolamento) il diametro primitivo dell'ingranaggio. Ma potrebbe anche avere un profilo con un angolo diverso se il diametro di rotolamento fosse maggiore o minore del diametro primitivo nominale.

Nel sistema Maag, invece la mola si presenta sul pezzo con un angolo di zero gradi. Il rotolamento avviene sul diametro di base dell'ingranaggio. Queste macchine non vengono più costruite ma ne esistono ancora molte in funzione.

Nella generazione discontinua vengono rettificati uno o due fianchi e poi si ha lo scatto di divisione per passare su un altro vano: da qui il nome di rettifica discontinua.

- Generazione continua

In questo metodo si usa una mola a vite che può avere uno o più principi. La cinematica del processo è simile a quella della dentatura con creatore, infatti la mola a vite si può paragonare ad un creatore senza scanalature di affilatura.

L'asportazione di materiale non avviene con degli spigoli taglienti come con il creatore, ma per abrasione con i piccoli taglienti dei cristalli di abrasivo.

La mola può avere dimensioni molto variabili, in funzione della macchina rettificatrice ed a seconda del materiale con cui è costruita la mola.

Per le mole di ceramica il diametro esterno può variare da 250 a 450 mm, mentre per le mole in CBN il diametro è notevolmente minore e può andare da 80 a 200 mm.

La scelta del numero di principi deve tener conto del numero di denti dell'ingranaggio e del tipo di lavorazione che si deve eseguire.

La regola è, come nei creatori, che il numero di principi della mola non deve dividere esattamente il numero di denti dell'ingranaggio. Se non si rispetta questa regola esiste la possibilità di un maggior errore di divisione tra i vari denti dell'ingranaggio.

Inoltre bisogna tener presente che maggiore è il numero di principi, minore è il tempo di rettifica, ma la finitura risulterà più grossolana. Si potranno scegliere mole con alto numero di principi in operazioni di sgrossatura.

Come nella dentatura con creatore, anche nella rettifica con mola a vite, la mola deve traslare nella direzione assiale del pezzo per poter finire tutta la fascia dentata. Dall'avanzamento per giro pezzo dipende la precisione dell'elica, infatti, la solcatura lasciata dalla mola, pur essendo molto meno profonda che nella dentatura, può, in certi casi, essere messa in evidenza sul diagramma dell'elica.

Inoltre la mola ha una larghezza maggiore rispetto all'arco di contatto con l'ingranaggio e ciò permette, analogamente ai creatori, di eseguire un certo numero di shifting per poter eseguire un maggior numero di pezzi. (Figura N°2)

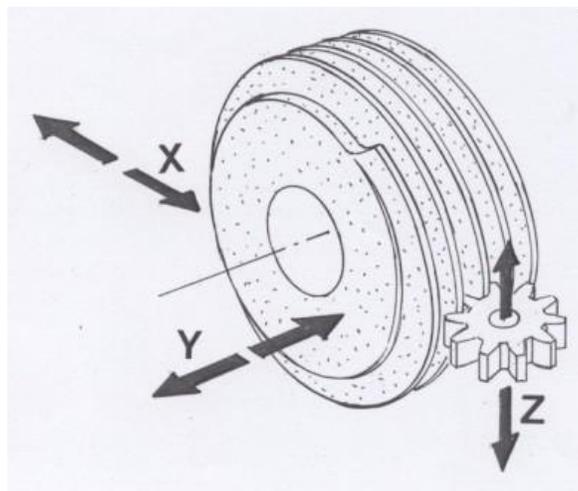


Figura N°2- Schema di lavorazione con mola a vite

Esiste però anche una tecnica di rettifica a plongée (Reishauer RZP) in cui la mola avanza radialmente. In questo caso si usa una mola globoidale, con la quale il contatto avviene in un ampio settore circolare dell'ingranaggio comprendente più denti. Questo metodo è molto veloce e viene impiegato nel settore automobilistico su ingranaggi di fascia non troppo grande. (Figura N°3).

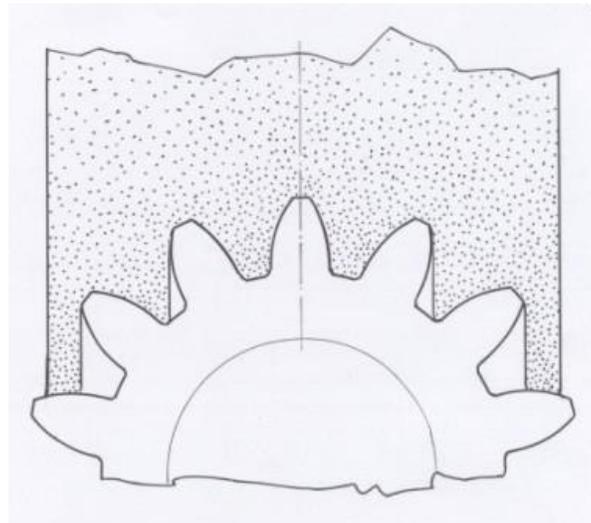


Figura N°3- Schema di lavorazione con mola globoidale

- Rettifica di forma

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°4).

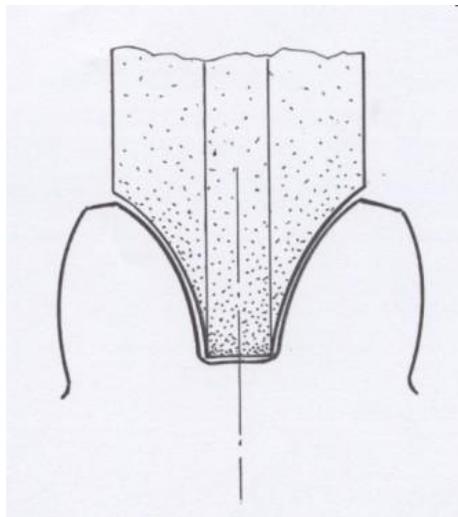


Figura N°4- Schema di lavorazione con mola di forma

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

Anche in questo caso 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 300 mm e naturalmente anche in questo caso il materiale abrasivo può essere del tipo ceramico o CBN.

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

Questo è uno dei 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.

Caratteristiche fisiche delle mole

Per prima cosa bisogna parlare del materiale con cui vengono costruite le mole in genere, comprese quelle destinate a lavorare gli ingranaggi.

Essi si dividono in due categorie con caratteristiche completamente diverse sia per quanto riguarda la composizione chimica del materiale tagliente, sia per il metodo di costruzione e sia infine per la loro utilizzazione in macchina; sinteticamente le possiamo individuare in:

- *mole in ceramica convenzionali (o mole vetrificate);*
- *mole in CBN.*

Mole in ceramica convenzionali

Bisogna precisare subito che questo termine a volte è improprio, ma esso è entrato comunemente in uso per indicare tutte quelle mole che hanno una struttura formata da grani di ossido di alluminio o di carburo di silicio legati da un agglomerante, che può essere di vario tipo, e che possono essere facilmente diamantate con diamanti a punta singola o con rulli diamantati rotanti, o sagomate con appositi rulli in acciaio.

Anche se non è lo scopo principale di questo articolo analizzare in modo approfondito i vari tipi di materiali usati per costruire le mole, pure non si può fare a meno di dare almeno qualche informazione fondamentale sulle caratteristiche fisiche degli abrasivi e sulle sigle che servono ad individuarle.

Esistono, come si può ben immaginare, innumerevoli tipi di mole che vengono caratterizzate da:

- *tipo di abrasivo*
- *dimensione del grano*
- *grado di durezza*
- *struttura*
- *agglomerante*

Tipo di abrasivo

Gli abrasivi per la fabbricazione di mole di tipo tradizionale sono caratterizzati dalle seguenti proprietà: durezza, taglienza, tenacità, friabilità, resistenza al calore. Nelle mole di questo tipo si usano normalmente l'ossido di alluminio (Al_2O_3) identificato universalmente con la lettera A, ed il carburo di silicio (SiC) individuato dalla lettera C.

Mentre l'ossido d'alluminio viene usato nella rettifica degli acciai, compresi gli ingranaggi, le mole in carburo di silicio vengono usate per la rettifica dei carburi sinterizzati (carbide).

L'ossido di alluminio viene ottenuto o dalla fusione della bauxite o direttamente dall'allumina pura ed ha un elevato grado di purezza: circa il 99% di Al_2O_3 .

Già da molti anni sono in commercio mole in ossido d'alluminio ceramico che ha la proprietà di avere una struttura microcristallina controllata ed una durezza superiore agli altri ossidi d'alluminio.

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.

Questo materiale viene usato frequentemente nella costruzione delle mole destinate alla rettifica degli ingranaggi, in quanto dà prestazioni intermedie tra i normali ossidi d'alluminio e il CBN e consente di ottenere produzioni maggiori con costi minori.

Dimensione del grano

Viene indicata con un numero che è inversamente proporzionale alla effettiva dimensione media del grano. A numero basso corrisponde una grana grossa ed a numero alto corrisponde una grana fine.

Dalla dimensione della grana dipende in certa misura il grado di finitura e la capacità di asportazione. Nella tabella seguente sono riportate le dimensioni del grano in base al numero identificativo secondo la FEPA (Federation of European Producer of Abrasives - Parigi).

Tab.N°1

<i>Diametro approssimativo del grano</i>					
<i>N° indicativo FEPA</i>	<i>Diametro in mm</i>	<i>Diametro in pollici</i>	<i>N° indicativo FEPA</i>	<i>Diametro in mm</i>	<i>Diametro in pollici</i>
36	0,500	0,0200	150	0,080	0,0030
46	0,350	0,0140	180	0,070	0,0028
54	0,300	0,0120	220	0,060	0,0024
60	0,250	0,0100	240	0,050	0,0021
70	0,210	0,0080	280	0,040	0,0017
80	0,180	0,0070	320	0,030	0,0012
90	0,150	0,0060	400	0,020	0,0008
100	0,130	0,0050	500	0,014	0,0006
120	0,100	0,0040	600	0,010	0,0004

A differenza delle mole con abrasivi convenzionali, per gli abrasivi in CBN o in diamante il numero che identifica la dimensione del grano corrisponde all'effettivo diametro del grano espresso in micrometri.

Grado di durezza della mola

La durezza della mola è indicata con una lettera maiuscola dell'alfabeto (dalla B alla Z). La durezza della mola rappresenta la forza con cui i grani di abrasivo sono trattenuti dall'agglomerante.

Essa dipende dalla quantità di agglomerante e dalla pressione di formatura. Più agglomerante è contenuto nella mola, maggiore è la forza con cui i grani sono trattenuti. Una mola di grado B è la più tenera, mentre una mola di grado Z è la più dura.

Struttura della mola

Per struttura si intende la distanza tra i vari grani abrasivi, cioè la sua porosità.

Essa viene indicata con un numero progressivo che può andare da 2 ad oltre 12. Con 2 si intende una struttura chiusa (poco porosa), con 12 si intende una struttura aperta (molto porosa).

Le strutture chiuse o medie sono indicate quando è necessaria una buona tenuta del profilo, come per esempio nella rettifica degli ingranaggi.

Una struttura aperta facilita lo scarico dei trucioli, rende più efficace l'azione del refrigerante e l'azione di taglio è migliore. E' indicata nelle rettifiche con grandi superfici di contatto tra mola e pezzo.

Agglomerante

E' il componente che trattiene ed unisce i grani abrasivi rendendo più o meno facile il loro distacco dal corpo della mola.

Una maggiore quantità di agglomerante rende la mola più dura, cioè i grani si staccano con maggior difficoltà.

Esistono diversi tipi di agglomerante individuati da una lettera ed in particolare:

- Agglomerante vetrificato (V): viene usato nella maggior parte delle operazioni di rettifica di precisione. Conferisce alle mole una maggiore costanza dimensionale, una maggiore omogeneità della porosità, resiste bene all'azione dei liquidi refrigeranti.
- Agglomerante resinoide (B): è costituito da resine sintetiche e viene adoperato su mole impiegate ad alta velocità in lavorazioni pesanti. Risentono dell'azione dell'acqua e di altri liquidi refrigeranti ed inoltre sono soggetti ad invecchiamento.

- Gomma (R): questo agglomerante è usato in particolari tipi di mole per finiture accurate, per rettifiche senza centri, ecc. E' soggetto ad invecchiamento.
- Gommalacca (E): è usato per mole destinate su rettifiche in tondo per finiture molto spinte.

Dopo questa lettera ogni costruttore aggiunge altre lettere o numeri che caratterizzano meglio il tipo di agglomerante.

Per esempio, la specifica della ditta Norton 32A 46 M6 VBE individua una mola con grani in ossido di alluminio del tipo 32, grana 46 (diametro medio 0,35 mm), durezza M (media), struttura 6 (media), agglomerante vetrificato del tipo Norton BE.

Nelle mole a vite per la rettifica di ingranaggi si usano in genere abrasivi in ossido d'alluminio, oggi più frequentemente quelli di tipo ceramico, cioè con microcristalli di abrasivo.

La grana può andare da 80 a 120 e, per moduli inferiori a 1 mm, anche grana 150 o 180.

La durezza è in genere media, cioè da H a K, mentre la struttura è in genere aperta o molto aperta, cioè da 7 a 18.

L'agglomerante è del tipo vetrificato nella quasi totalità dei casi.

Nelle mole per rettifica di forma o in quelle per generazione discontinua la grana è un po' più fine, anche per moduli grandi si può arrivare a 120 o 180 e questo per poter ottenere un buon grado di finitura. La durezza è minore, circa del grado F e la struttura è molto aperta, intorno a 15 – 18.

La scelta della specifica ideale per ogni singola operazione di rettifica deve tener conto di diversi parametri e in genere essa viene trovata dopo alcune prove in cui si variano, oltre le specifiche, anche i parametri di lavoro, quando ciò è possibile.

Bisogna tener conto infatti del metodo di rettifica, del tipo di materiale dell'ingranaggio, delle caratteristiche dimensionale del pezzo che si vuole rettificare, del grado di precisione e della finitura superficiale che si vuole ottenere, della macchina usata e delle condizioni di lavoro. In genere, dopo una prima prova con una determinata specifica si eseguono alcuni test variando i parametri essenziali della mola per verificare l'esito pratico.

La profilatura delle mole in ossido d'alluminio

Bisogna distinguere tra le mole a vite e le mole biconiche o di forma.

Le prime possono venire fornite dal costruttore grezze, cioè nella forma di un semplice cilindro con foro di calettamento oppure già preformate, con una filettatura ricavata sul diametro avente i denti di dimensione corrispondente all'ingranaggio da lavorare.

I fianchi dei denti sono rettilinei e la sezione normale di questa filettatura corrisponde alla cremagliera di riferimento della dentatura da rettificare.

L'operazione di profilatura viene eseguita con un apposito rullo, del tipo rappresentato in figura N°5a e può essere fatta dal costruttore o dall'utilizzatore.

La mola sagomata si presenta come in figura N°5b.

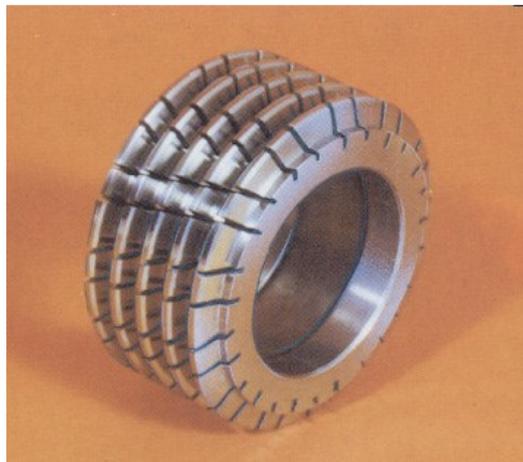


Figura N°5 a - Rullo in acciaio per sagomatura della mola a vite



Figura N°5 b – Mola a vite in ceramica sagomata

La mola così sagomata in genere non ha però una precisione sufficiente e quindi deve essere ripassata con i diamantatori operanti sulla macchina. Essi possono utilizzare un semplice disco biconico diamantato, con l'angolo del profilo corrispondente all'angolo di pressione da ottenere sulla mola, come indicato in figura N°6.

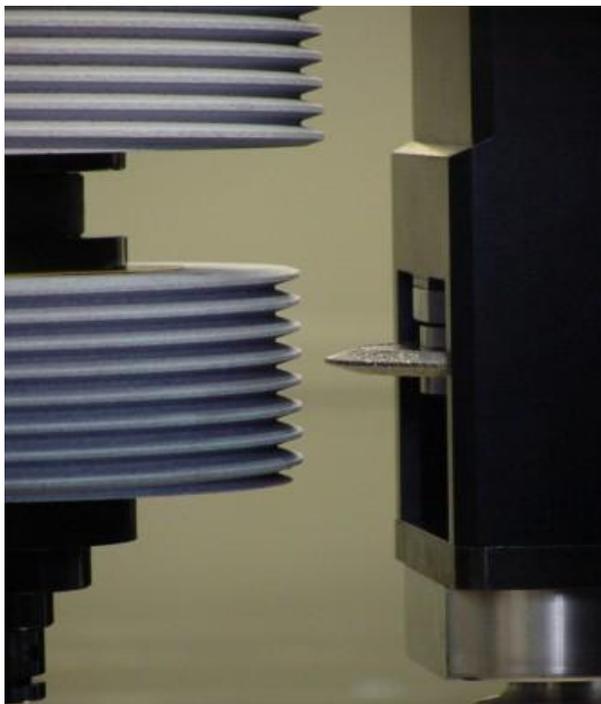


Figura N°6- Diamantatura con un disco biconico unico

Oppure si possono usare due dischi conici, uno per ogni fianco del profilo ed in questo caso è possibile una certa regolazione degli angoli, come indicato in figura N°7.

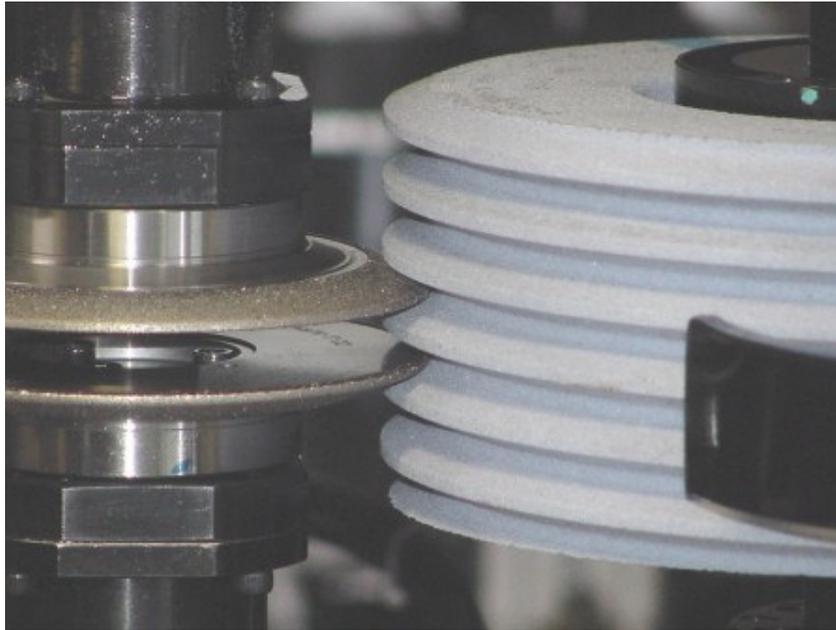


Figura N°7- *Diamantatura con due dischi diamantati regolabili*

La mola così ottenuta è in grado di rettificare tutti gli ingranaggi che hanno la stessa cremagliera di riferimento.

La precisione del profilo è molto elevata e dipende ovviamente dalla precisione dei dischi diamantati, ma in ogni caso l'errore di profilo è inferiore al micrometro.

Un po' più problematico è ottenere la stessa precisione sulla divisione dei vari principi della mola anche se questo errore è contenuto in circa 2 micrometri. Tuttavia questo errore non è molto influente sulla precisione finale dell'ingranaggio in quanto, come si è detto, si ha sempre l'avvertenza di usare mole con un numero di principi che non divida esattamente il numero di denti del pezzo, così come si fa normalmente con i creatori.

La diamantatura delle mole del tipo globoidale viene eseguita con uno speciale master diamantato che ha la dentatura uguale a quella dell'ingranaggio.

Simulando la lavorazione di questo ingranaggio diamantato si ottiene la ravvivatura della mola. Questo metodo è indicato nelle lavorazioni di grandi serie e viene usato talvolta anche per diamantare le mole a vite normali.

La profilatura delle mole usate nella rettificazione discontinua o in quella di forma, può essere fatta o con una coppia di diamanti singoli o con un rullo diamantato rotante come schematizzato in figura N°8.

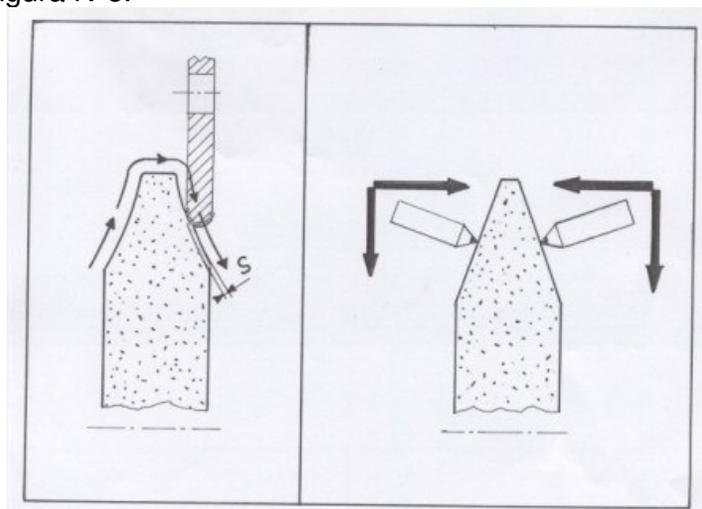


Figura N°8- *Schema di diamantatura di mole singole e di forma*

La precisione del profilo dipende in questo caso dalla precisione dei movimenti gestiti dal controllo numerico della macchine ed in misura importante anche dallo stato di usura dei diamanti singoli o del rullo diamantato.

Le mole in CBN

Parliamo per prima cosa delle mole elettrodepote, intendendo con ciò che i grani di abrasivo, diamante o CBN, sono fissati su un corpo di metallo con un processo di elettrodeposizione di tipo galvanico.

Questo tipo di mola, però non è il solo ad usare il CBN, infatti esistono anche le cosiddette mole al CBN diamantabili di cui daremo un breve cenno più avanti.

Intanto bisogna precisare subito che la sigla CBN, con cui si identifica il Nitrato Cubico di Boro, pur essendo di uso comune, è sottoposto al brevetto della General Electric.

Altre ditte produttrici, come la Van de Beers, individua questo abrasivo con la sigla ABN.

Il nitrato cubico di boro, che per brevità qui chiameremo sempre CBN, ha la caratteristica di essere estremamente duro, tanto che viene anche chiamato diamante artificiale.

Le mole in CBN hanno sostituito in moltissime operazioni le mole diamantate, inclusa la rettifica degli ingranaggi.

Esse possono lavorare egregiamente su acciai cementati e temprati con durezza prossime a HRC 60.

I grani di CBN vengono depositati su un corpo in acciaio ed ancorati con uno strato di Nichel.

Dalla precisione geometrica del corpo dipende in gran parte la precisione finale della mola e quindi la sua preparazione deve essere accurata e deve rispettare le precisioni sul profilo, sulla sua finitura superficiale e, soprattutto, nella sua equilibratura. La lavorazione del corpo viene eseguita con le più moderne rettifiche a controllo numerico che garantiscono il rispetto di tolleranze prossime al micrometro.

La funzione del nichel è quella di ancorare saldamente i grani di abrasivo sul corpo. Lo spessore dello strato di nichel e quindi la durata del processo di deposizione galvanica, dipende dal diametro dei grani di abrasivo.

Il nichel, inoltre, non deve essere né eccessivamente duro, pena il rischio di rotture, né troppo tenero in quanto si usurerebbe velocemente consentendo il distacco prematuro dei grani.

Il processo galvanico è quindi molto delicato ed i suoi parametri (temperatura, tipo di elettrolito, tipo di nichel, tempo di immersione, ecc) devono essere equilibrati con molta attenzione.

Il ciclo di deposizione può avere una durata molto variabile, da 10 a 30 ore.

Dopo la deposizione dei grani, fissati con il nichel, si esegue una ripassatura del profilo con una mola diamantata per livellare le eventuali micro-irregolarità della superficie migliorando in questo modo l'azione di taglio, la precisione e la rugosità superficiale sul pezzo rettificato.

Non si tratta mai comunque di modificare il profilo per correggere eventuali errori, l'asportazione è limitata alle asperità che sporgono oltre il profilo teorico.

Per rendersi conto della delicatezza del processo di ricopertura, specie per le mole destinate alla rettifica degli ingranaggi, basta dare uno sguardo al seguente elenco di criteri per la valutazione della qualità di una mola elettrodeposta:

- *qualità della deposizione del nichel;*
- *uniformità della deposizione,*
- *lucidità del nichel;*
- *durezza del nichel;*
- *uniformità della distribuzione dei grani;*
- *grado di sporgenza dei grani;*
- *spaziatura tra le punte dei grani.*

Le mole in CBN per la rettifica degli ingranaggi, possono essere quelle a vite o quelle destinate alla rettifica di forma.

Le mole a vite possono avere da 1 a 5 principi, ma difficilmente oltre questo limite. Il loro diametro normalmente è molto inferiore a quello delle mole in ceramica ed è compreso tra 80 e 150 mm.

Le mole per la rettifica di forma invece possono avere un diametro molto piccolo, anche 35 – 40 mm, ed arrivare a 150 o, in alcuni casi, anche a 200.

Quando hanno eseguito un determinato numero di pezzi, o più precisamente quando hanno rettificato un certo numero di metri di dentatura, esse non possono essere rinvivate e devono essere inviate al costruttore per il loro ripristino.

Il ciclo di ripristino prevede l'asportazione con mezzi chimici del nichel e dei diamanti usurati, il controllo e l'eventuale ripassatura del profilo del corpo, e la rideposizione del CBN con il bagno galvanico.

La mola a questo punto è da considerarsi come nuova.

Vantaggi delle mole in CBN elettrodeposte

Le mole in CBN, sia quelle a vite che quelle di forma, hanno una serie di vantaggi rispetto a quelle in ceramica, che compensano largamente il loro maggior costo, specie nelle produzioni di grandi serie.

I vantaggi principali si possono riassumere in:

- *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 rinvivature 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.*

Naturalmente accanto a questi vantaggi ci sono anche alcuni lati negativi, primo fra tutti è il maggior costo delle mole in CBN, compreso il maggior costo dello stoccaggio delle mole e della gestione delle rigenerazioni.

Un secondo punto che bisogna considerare è che la precisione del profilo dipende dal costruttore e non può essere gestita dall'utilizzatore. Nel caso si voglia modificare leggermente il profilo, non è quasi mai possibile farlo con l'uso di mole diamantate; è necessario rifare la mola.

La macchina rettificatrice deve avere inoltre un dispositivo per compensare l'allungamento termico del mandrino portamola ed evitare così un possibile incremento dell'errore di divisione.

Quando si impiegano mole in ceramica questo dispositivo non è necessario in quanto le frequenti diamantature riportano automaticamente sull'asse del vano dente il profilo della mola.

Cenni sulle mole in CBN diamantabili

Come già accennato esiste un tipo di mola, ed è usato qualche volta, in cui i grani di CBN sono tenuti insieme da un composto ceramico. Si può pensare ad una mola in ceramica in cui i grani abrasivi invece di essere ossido d'alluminio o di carburo di silicio, sono in CBN.

La mola così ottenuta ha quasi le proprietà di una mola elettrodeposta, ma ha il vantaggio di poter essere diamantata, anche se con una certa difficoltà.

In primo luogo, dato il costo elevato del composto, nel settore della rettifica degli ingranaggi, si costruiscono solo mole del tipo di forma o quelle per la generazione discontinua, mai mole a vite.

Il profilo può essere modificato e la mola può essere ravnivata in macchina solo con un rullo diamantato rotante fino a completo esaurimento dello strato abrasivo.

La mola è costituita da un corpo in metallo su cui viene fissato uno strato di legante e di CBN di alcuni mm. Lo spessore di questo strato determina la possibilità di sfruttamento della mola.

Queste mole hanno un costo molto elevato, ma presentano il vantaggio che non è necessario rigenerare presso in costruttore ed inoltre permettono di modificare il profilo secondo le necessità.

Usura e durata delle mole

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 ravnivature possibili.

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

Infine bisogna considerare che i metri di dentatura eseguibili con una mola a vite dipendono dalla sua larghezza, cioè dalla maggiore o minore possibilità di shifting.

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 ravnivatura 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 ravnivature si fanno alla fine di uno o più cicli di rettifica, non si può ovviamente diamantare a metà di un ciclo.

Per ogni ravnivatura viene asportato circa un soprametallo di $S = 0,015$ mm in senso ortogonale al profilo in prossimità del diametro primitivo (vedere figura N°10) a cui corrisponde una certa riduzione di diametro ΔD calcolabile con le seguenti formule.

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

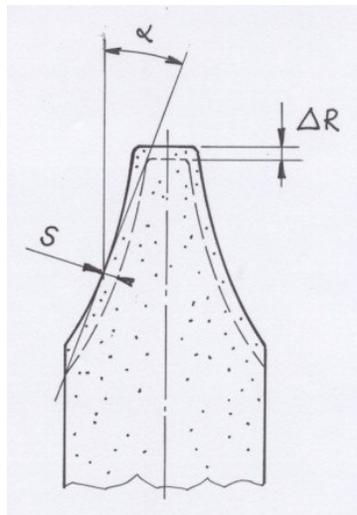


Figura N°9 - Riduzione del diametro esterno in diamantatura

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.

Per la mola a vite il procedimento di calcolo del rendimento è uguale. Con la sola differenza che il numero di metri eseguibili per ogni ravnatura è maggiore in quanto si ha lo sfruttamento della larghezza della mola. Nella tabella N°2 sono riportati alcuni esempi di durata delle mole a vite in Al_2O_3 .

Tabella N°2 . Esempi di lavorazione con mole a vite in ceramica (Diametro esterno 220 mm)

Dati ingranaggio						Dati mola e rendimento					
N° di denti	modulo mm	fascia mm	angolo di elica	lunghezza totale denti m	angolo di pressione	N° di principi	Larghezza mm	m rettificati per ravnatura	N° totale ravnature	totale m rettificati	totale pezzi rettificati
28	3,16	40,0	27,0	1,257	17,5	3	104	26,397	270	7.127	5.670
27	2,70	42,0	26,5	1,267	17,5	2	104	32,942	270	8.894	7.020
13	3,70	120,9	12,0	1,607	20,0	3	84	28,926	270	7.810	4.860
52	2,70	35,5	26,5	2,062	17,5	5	84	26,806	270	7.238	3.510
42	3,70	34,7	12,0	1,490	20,0	4	104	20,86	270	5.632	3.780
35	3,23	30,9	24,0	1,184	17,5	3	104	18,944	270	5.115	4.320
23	2,70	34,9	26,5	0,897	17,5	3	104	25,116	270	6.781	7.560

Per le mole in CBN non si parla più di ravnature in quanto la mola quando non è più in grado di tagliare in modo corretto (errori di profilo, scarsa qualità della superficie del dente) viene sostituita ed inviata al costruttore per la rigenerazione.

La durata delle mole di forma in CBN dipende ovviamente dal diametro esterno della mola e da altri innumerevoli fattori, ma si può dire che approssimativamente i metri di dentatura eseguibili sono:

- *Diametro mola 40 mm : metri di dentatura = 200 – 250*
- “ “ 80 “ : “ “ “ = 400 - 500
- “ “ 100 “ : “ “ “ = 500 - 600
- “ “ 120 “ : “ “ “ = 600 - 700
- “ “ 150 “ : “ “ “ = 800 - 1000

Per quanto riguarda le mole a vite in CBN il discorso è un po' più complesso in quanto oltre al diametro ed ad altri fattori bisogna considerare anche il numero di principi e la larghezza della mola e quindi il numero degli shifting possibili.

Semplificando al massimo si può dire che approssimativamente si possono moltiplicare i valori di cui sopra per il numero di spire presenti nella mola.

Per conoscere questo numero è sufficiente dividere la larghezza della mola per il passo assiale della filettatura.

Per esempio, una mola a vite di diametro 150 mm di larghezza 80 mm di modulo 2,5 mm può avere una durata complessiva di circa 8.000 – 10.000 metri.

Condizioni di lavoro

Come sempre, quando si tratta di suggerire le migliori condizioni di lavoro per le operazioni di taglio con utensili o di rettifica, bisogna premettere che i dati sono necessariamente molto approssimativi.

Specie nella rettifica degli ingranaggi le cose sono molto complicate per l'estrema varietà dei fattori in gioco.

Pur supponendo di disporre di macchine rettificatrici a CN dell'ultima generazione, bisogna pur sempre tener conto dei parametri fondamentali quali: il metodo di rettifica, il materiale lavorato, il tipo di ingranaggio da lavorare, il tipo e la specifica della mola, la precisione desiderata, il soprametallo da asportare ed altri ancora.

Si capisce quindi che la casistica è talmente vasta che non si possono, in questa sede, dare indicazioni valide per ogni tipo di lavorazione.

Per dare un'idea delle velocità e degli avanzamenti si riportano quindi solo alcuni esempi di lavorazione eseguite con la macchina rettificatrice S400GT della Samputensili di Bologna, una macchina questa, che può lavorare con ogni metodo di rettifica, alternando, se necessario, in uno stesso ciclo la rettifica con mola a vite con quella di forma.

Esempio N°1 (figura N°10)



Figura N°10

Metodo di rettifica: per generazione continua con mola a vite

Dati ingranaggio		
Modulo normale	mm	2,5
Numero di denti		23
Angolo di pressione		17°30'
Angolo di elica (destra)		28°
Diametro esterno	mm	72,70
Larghezza fascia dentata	mm	23
Durezza HRC		58 - 62
Caratteristiche della mola		
Tipo di abrasivo		Al ₂ O ₃ vetrificato
Numero di principi		1
Diametro esterno	mm	200
Specifica		93A 80H 15VP
Parametri di lavoro e risultati		
Fase	sgrossatura	finitura
Velocità di taglio m/sec	45	45
Soprametallo per fianco mm	0,12	0,06
Numero di passate	2	1
Avanz. assiale mm/giro pezzo	0,3	0,5
Shifting mm	2	3
Tempo ciclo min	1,5	
R _z ottenuto micron	1,26	
Precisione geometrica	Classe DIN 4	

Esempio N°2 (Figura N°11)

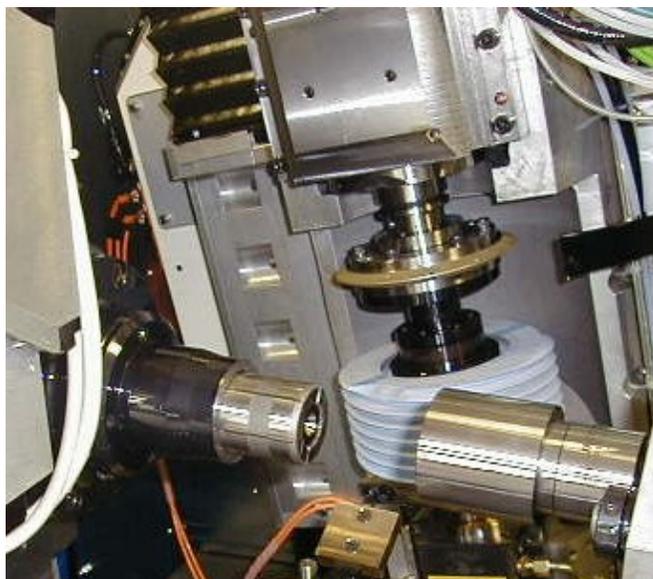


Figura N°11

Si tratta di una lavorazione con un ciclo misto: la sgrossatura viene fatta con mola a vite in Al_2O_3 mentre la finitura è eseguita con mola di forma in CBN. Questo è possibile sulla rettificatrice Samputensili S400GT e consente di avere tempi ciclo brevi anche con un numero di denti relativamente alto e di poter rettificare anche il fondo del dente aumentando la resistenza dell'ingranaggio.

Dati ingranaggio		
Modulo normale	mm	4,0
Numero di denti		40
Angolo di pressione		20°
Angolo di elica (sinistra)		14°
Diametro esterno	mm	172,20
Larghezza fascia dentata	mm	45
Durezza HRC		58 - 62
Caratteristiche delle mole		
Costruttore	Winterthur	Samputensili
Fase	sgrossatura	finitura
Tipo di mola	a vite	di forma
Tipo di abrasivo	Al_2O_3	CBN elettrodeposto
Numero di principi	3	--
Diametro esterno	mm	200
Specifica o dimensione del grano	93A 80H 15VP	B126
Parametri di lavoro e risultati		
Fase	sgrossatura	finitura
Velocità di taglio m/sec	45	40
Soprametallo per fianco mm	0,13	0,04
Numero di passate	2	2
Avanzamento. assiale	0,40 mm/giro pezzo	3000 mm/min
Shifting mm	5	--
Tempo ciclo min	5,15	
Precisione geometrica	Classe DIN 5	

Esempio N°3 (Figura N°12)



Figura N°12

L'esempio si riferisce ad un ingranaggio che viene lavorato con due tipi di mola a vite, una in CBN per la sgrossatura ed una in Al_2O_3 per la finitura.

L'asportazione di materiale in sgrossatura è quindi veloce mentre in finitura, con una grana fine e con piccoli avanzamenti assiali si possono ottenere precisioni più elevate.

Dati ingranaggio		
Modulo normale	mm	2,67
Numero di denti		64
Angolo di pressione		20°
Angolo di elica (destra)		20°
Diametro esterno	mm	189,40
Larghezza fascia dentata	mm	27
Durezza HRC		54 - 56
Caratteristiche delle mole		
Costruttore	Samputensili	Winterthur
Fase	sgrossatura	finitura
Tipo di mola	a vite	A vite
Tipo di abrasivo	CBN elettrodeposto	Al_2O_3
Numero di principi	5	3
Diametro esterno	mm	160
Specifico o dimensione del grano	B151	79A120H 18VP
Parametri di lavoro e risultati		
Fase	sgrossatura	finitura
Velocità di taglio m/sec	50	38
Soprametallo per fianco mm	0,12	0,015
Numero di passate	1	1
Avanz. assiale mm/giro pezzo	0,70	0,40
Shifting mm	0,2	0,9
Tempo ciclo min		1,5
R_z ottenuto micron		1,26
Precisione geometrica		Classe DIN 4