

2 - MACCHINE ED UTENSILI PER ALTA VELOCITÀ

Le macchine per Alta Velocità (HSM) differiscono dalle classiche macchine utensili per alcuni elementi caratteristici che le contraddistinguono:

- Velocità ed accelerazione degli assi
- Velocità di rotazione dell'utensile
- Rigidezza della struttura
- Controllo numerico

La fresatura ad Alta Velocità (High Speed Milling) si pone infatti come obiettivo quello di aumentare la capacità di asportazione di truciolo delle macchine utensili non più agendo sulla grossa potenza di asportazione alle basse velocità, ma sulla capacità delle macchine utensili di poter eseguire i percorsi di lavorazione sempre più velocemente e con precisioni aumentate, grazie ad utensili in grado di lavorare con velocità di taglio più elevate. Se per una macchina utensile tradizionale valori di velocità di avanzamento degli assi di 10-15 m/min, accelerazioni dell'ordine di 1-1,5 m/s² e velocità di rotazione del mandrino di 7.000-10.000 rpm sono parametri del tutto accettabili e condivisi dal mercato, per una macchina ad Alta Velocità si parla invece di velocità di avanzamento degli assi di 30-60 o addirittura di 100 m/min, accelerazioni che vanno dai 3-6 m/s² fino ai 15 m/s² e velocità di rotazione del mandrino che partendo dai 16.000-24.000 rpm arrivano fino ai 40.000 rpm. Nelle macchine per HSM l'incremento dei parametri caratteristici utilizzati per valutare le capacità di lavoro della macchina è del 300-400% rispetto a quelli delle macchine utensili tradizionali.

Anche gli utensili hanno caratteristiche particolari permettendo delle velocità di taglio notevolmente più elevate. Se prendiamo ad esempio gli acciai, grazie ai nuovi materiali con cui sono realizzati gli utensili, ai trattamenti e rivestimenti le velocità di taglio sono passate dai 100-150 m/min ai 250-300 m/min oppure a parità di velocità gli avanzamenti per dente sono triplicati.

2 - MACHINES & TOOLS FOR HIGH SPEED MILLING

The high speed machines (HSM) are different from the traditional machine tools in some characteristic elements that make them different:

- *Speed and acceleration of the axes*
- *Tool rotation speed*
- *Stiffness of the structure*
- *Numerical control*

High speed milling is designed to increase the capacity of chip removal of the machine tools, while no longer relying on high removal power at low speed, but on the capacity of the machine tools to be able to carry out work passes more and more quickly and with increased precision, thanks to the tools which are able to work with higher cutting speeds.

For a traditional machine tool, feed speed values for the axes of 10-15 metres/min, acceleration of about 1-1.5 metre/sec² and rotation speed for the electrospindle of 7,000-10,000 rpm are parameters which are quite acceptable and widespread in the market. However for high speed machines, we have feed speeds for the axes of 30-60 or even 100 metres/min, an acceleration that goes from 3-6 metre/sec² up to 15 metre/sec² and spindle speed range that start at 16,000-24,000 and go up to 40,000 rpm.

In machines for HSM, the increase in the characteristic parameters used to evaluate the work capacity of the machine is 300-400% of that for traditional machine tools.

The tools also have particular characteristics that allow considerably higher cutting speeds. Taking steel, for example, thanks to new materials with which the tools, treatment and coatings are produced, the cutting speed has changed from 100-150 metres/min to 250-300 metres/min; or at the same feed speed for teeth have tripled.

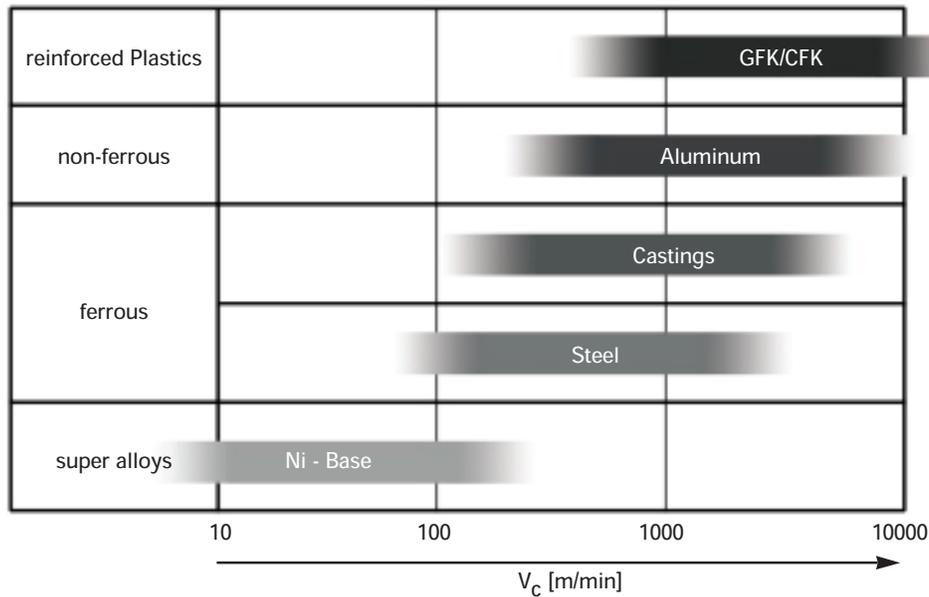


Fig. 28: La figura fa vedere come le velocità di taglio per le varie classi di materiali stanno evolvendo in funzione delle nuove tipologie di utensili per HSC (High Speed Cutting).

Fig. 28: The figure shows how the cutting speeds for the various classes of materials are evolving according to the new types of tools for high speed cutting (HSC).

L'aumento notevole della dinamica ha portato di conseguenza a dimensionare opportunamente la struttura della macchina utensile per Alta Velocità. Aumentando le accelerazioni, le forze d'inerzia generate dalle masse in movimento assumono un ruolo preponderante nel dimensionamento della macchina, anche rispetto agli sforzi di lavorazione. Ecco quindi che la macchina per HSM si rivolge ad architetture compatte, il più possibile simmetriche, dove gli elementi in movimento siano il minor numero ed i più leggeri possibile, ma allo stesso tempo sufficientemente rigidi per garantire la precisione e la qualità di finitura richiesta con la massima dinamica. L'incremento di prestazioni dinamiche ottenibile con architetture di tipo classico, grazie all'impiego di tecnologia più moderna, è dell'ordine di 2-3 volte, mentre su architetture espressamente concepite per Alta Velocità si possono utilizzare parametri cinematici fino a dieci volte superiori.

The considerable increase in the dynamics has led to a suitable dimensioning of the structure of the high speed machine tool. By increasing the acceleration, the forces of inertia generated by the masses in movement take on an important role in deciding on the dimensions of the machine, also regarding the work forces. Therefore the machine for HSM makes use of a compact architecture, as symmetrical as possible, where the moving parts are as few in number as possible and as light as possible; but at the same time sufficiently rigid to ensure the precision and quality of finish required, with the maximum dynamics. The increase on the dynamic performance obtainable with traditional architecture, thanks to state-of-the-art technology, is of the order of 2 to 3 times, while on architecture expressly conceived for high speed, you can use kinematic parameters up to ten times better.

2.1 - Architettura di fresatrici per HSM

2.1 - Milling centre architecture for HSM

Come abbiamo detto l'architettura della macchina ha un ruolo fondamentale per lo studio della dinamica, per minimizzare le forze inerziali e per garantire la precisione e la qualità di finitura del pezzo.

As we have said, the architecture of the machine has a fundamental role in the study of dynamics, to minimise the inertial forces and to ensure the precision and final piece quality.

Secondo una prima macro classificazione potremo suddividere le macchine utensili in due grandi categorie:

According to a first macro-classification, we could divide machine tools into two main categories:

- Macchine ad architettura cartesiana
- Macchine ad architettura parallela o esapodale

- Machines with Cartesian architecture,
- Machines with parallel or hexapodal architecture

Possiamo dire che la prima categoria costituisce il 95-99% delle macchine oggi presenti e proposte sul mercato, mentre la seconda rappresenta un recente tipo di architettura di macchina concepita espressamente per alcune applicazioni nel campo dell'Alta Velocità.

We can say that the first category includes 95-99% of the machines present and offered on the market today, while the second represents a recent type of machine architecture conceived expressly for some applications in the field of high speed.

Facendo riferimento solo alle macchine ad architettura cartesiana, possiamo distinguere al suo interno varie tipologie di architetture che possono ancora essere suddivise in due macro gruppi:

Looking only at the machines with Cartesian architecture, we can distinguish within the category various types of architecture, that could be sub-divided in two macro-groups:

- Macchine a banco fisso
- Macchine a banco mobile

- *Machines with fixed table*
- *Machines with moving table*

Le quali a loro volta possono essere distinte in:

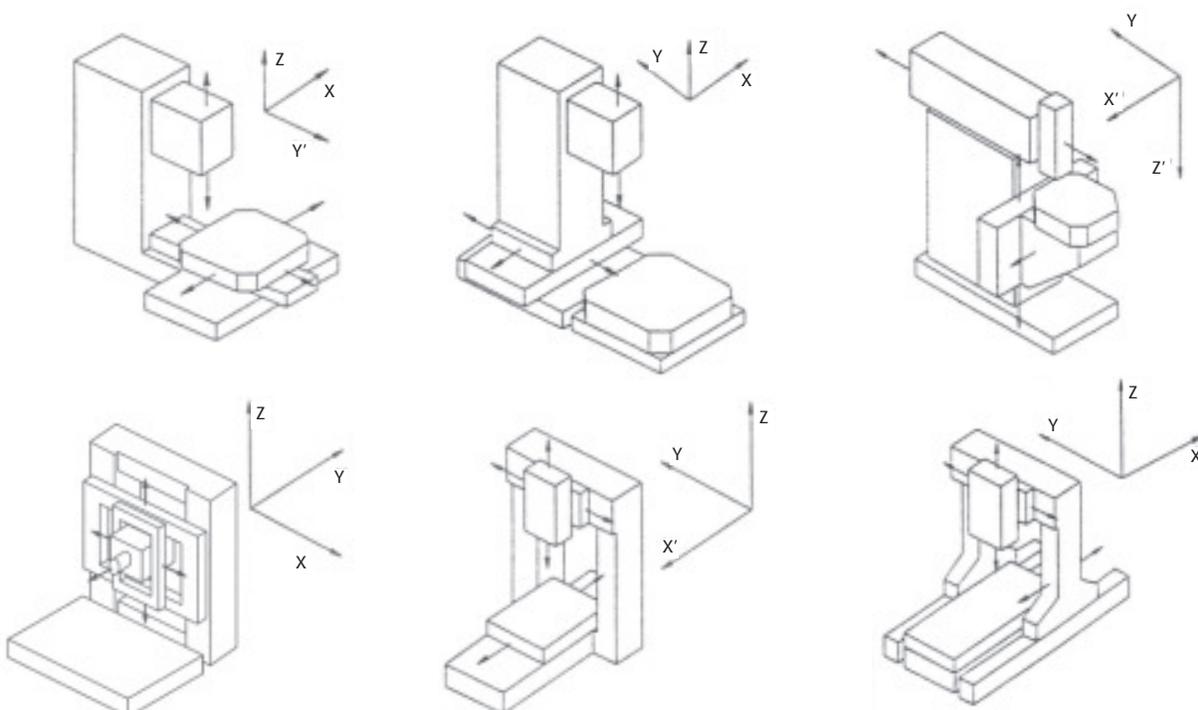
These can, in turn, be divided into:

- Strutture a C
- Strutture a T
- Strutture a montante (mobile o fisso)
- Strutture a portale (mobile, tutto il portale/ solo la traversa, o fisso)
- Strutture Box in Box

- *C-shaped structures*
- *T-shaped structures*
- *Upright structures (moving or fixed)*
- *Gantry structure (moving, the whole gantry / only the cross piece, or fixed)*
- *Box in box structures.*

È chiaro che ciascuna architettura si adatta maggiormente a certe tipologie di applicazione o settori d'impiego piuttosto che ad altri e che i concetti dell'Alta Velocità con opportuni dimensionamenti strutturali possono essere applicati a tutte le architetture. Tuttavia volendo fare una valutazione obbiettiva dobbiamo dire che le strutture che meglio si adattano ai concetti dell'Alta Velocità sono quelle a portale con traversa mobile per le macchine a mandrino verticale e quelle Box in Box per le macchine a mandrino orizzontale, in quanto presentano la migliore simmetria strutturale sia rispetto alle forze di lavoro che alle dilatazioni termiche e la maggiore riduzione e costanza di masse in movimento, quindi migliore dinamica.

It is obvious that each style of architecture is more suitable for a certain type of application or sector of use than for others, and that the concepts of high speed milling with suitable structural dimensioning can be applied to all architecture. However, if we wish to make an objective evaluation, we must say that the structures that are best suited to the high speed concepts are those of the gantry type with moving bridge for machines with a vertical electrospindle, and the Box in box style for the machines with horizontal electrospindle. This is because they have a better structural symmetry both with respect to the work forces and to thermal expansion and greater reduction and constancy of masses in movement, and so better dynamics.



Bisogna considerare che l'architettura della macchina influisce oltre che sulle prestazioni specifiche della stessa anche su altri aspetti collaterali, ma non di secondo piano, quali ad esempio l'accessibilità all'area di lavoro e quindi sulla facilità di caricamento e piazzamento del pezzo, sulla sicurezza e sull'impatto ambientale. Fattori questi che pur non essendo direttamente legati al risultato della lavorazione, influiscono direttamente sia sul ciclo produttivo che sull'organizzazione dell'officina.

2.2 - Componenti che caratterizzano una macchina ad Alta Velocità

Struttura

La struttura delle macchine per lavorazioni ad Alta Velocità deve garantire la massima dinamica degli assi unitamente alla rigidità necessaria per le lavorazioni e ad una notevole capacità di smorzamento delle vibrazioni.

Le strutture mobili devono essere quindi il minor numero possibile ed al tempo stesso contenute e con azionamenti baricentrici. Ecco quindi che la struttura a portale con ponte mobile si presenta come una delle strutture più idonee, se non la più adatta, per le applicazioni di Alta Velocità. La trave, anche se il carro è tutto ad una estremità, grazie alla movimentazione tipo gantry, presenta una spinta perfettamente bilanciata e le deformazioni a cui è sottoposta durante il movimento o la lavorazione sono inferiori rispetto ad una soluzione con trave a sbalzo o a montante mobile. Anche per quanto riguarda l'influenza delle dilatazioni termiche sulla precisione del pezzo lavorato la soluzione a portale verticale minimizza l'errore; ad esempio, la dilatazione in altezza delle spalle viene compensata dalla dilatazione in senso opposto del canotto.

Per combinare rigidità con pesi contenuti si è sempre più orientati verso l'impiego di strutture in acciaio elettrosaldato opportunamente centinate.

Per il basamento, che oltre ad avere la funzione di sostegno di tutta la macchina ha anche quella di smorzatore delle vibrazioni che dall'utensile attraverso la struttura si trasmettono al pezzo, oggi vengono introdotte soluzioni innovative come quelle di realizzarlo direttamente in conglomerato polimerico oppure con struttura combinata in carpenteria di acciaio elettrosaldato riempita di conglomerato polimerico.

Azionamento assi

Nel concetto di macchina per lavorazioni ad Alta Velocità l'azionamento degli assi è un sistema che non può essere avulso dal controllo numerico che gestisce la macchina. Vista l'elevata dinamica richiesta alle macchine HSM e quindi l'elevata banda passante di tutto il sistema di controllo e movimentazione dell'asse, la quantità ed il tipo di informazioni che devono essere scambiate nella catena di comando e controllo sono tali per cui è fondamentale che la tecnologia su cui deve essere basato tutto il sistema sia quella digitale.

We should bear in mind that the architecture of the machine not only has an influence on its specific performance but also on collateral aspects, which are no less important, such as the accessibility of the work area, for example, and thus the ease of lading and positioning the piece, on safety and on the impact on the environment. Although these factors do not directly affect the result of working, they directly influence the production cycle and the organisation of the factory.

2.2 - Components that are characteristic of a high speed machine

Structure

The structure of the machine for high speed milling must ensure maximum dynamics of the axes, together with the stiffness necessary for working, and a considerable capacity to dampen vibrations.

There must be as few moving structures as possible, and at the same time, be compact and with barycentric mechanisms. That is why the gantry structure with moving bridge is one of the most appropriate structures, if not the most ideal, for high speed applications.

The beam gives a perfectly balanced thrust, even if the carriage is right at one end, thanks to the gantry-type movement. Also the deformation to which it is subject during the movement or working inferior compared to a design with an overhanging beam or with moving upright. Also with regard to the influence of thermal expansion on the precision of the milled piece, the vertical gantry design minimises the error since, for example, the vertical expansion of the columns is compensated for by the expansion in the opposite direction of the tailstock.

To combine stiffness with a reduced weight, the trend has been towards the use of structures in electro-welded steel, suitably centred.

The base, as well as acting as a support for the whole machine, also has to dampen the vibrations that is retransmitted from the tool through the structure to the piece. And so there are now available innovative solutions, such as to make the base directly in polymer conglomerate, or with a combined structure of electro-welded steel filled with polymer conglomerate

Axis drive

In the design of machines for high speed milling, the axis drive is a system that cannot be detached from the numerical control that controls the machine.

Given the high dynamics required by the HSM machines, and the high band-pass of the whole system for controlling and moving the axis, the quantity and type of information that must be exchanged in the control and monitoring chain, it is essential that the technology on which the whole system is based is digital.

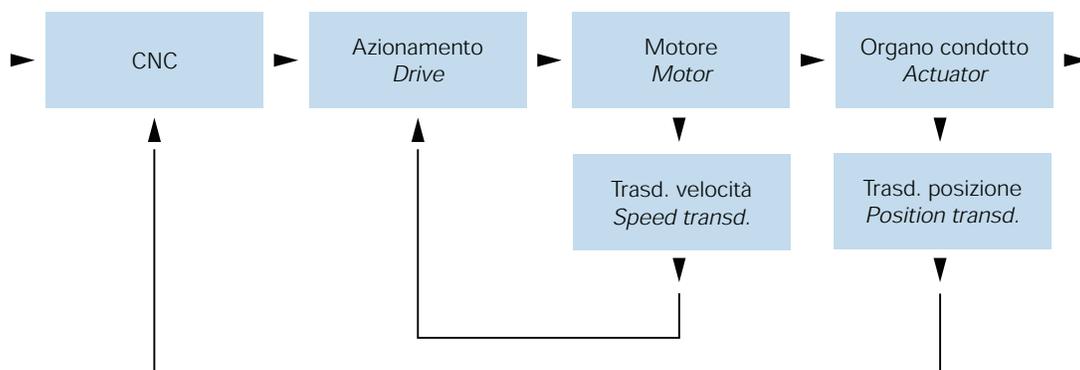


Fig. 30: Schema della catena di comando e controllo di un asse

Fig. 30: Illustration of the chain of control and monitoring of an axis

Come risulta evidente dallo schema, in tempi molto ridotti (dell'ordine di millisecondi) i dati che devono essere scambiati tra CNC, azionamento motore e trasduttori sono elevatissimi e solo con informazioni di tipo numerico è possibile correggere in modo ottimale il comportamento di ciascun componente in modo da raggiungere le massime performances sul pezzo in lavorazione.

In questi ultimi tempi si è lavorato molto anche sul miglioramento delle funzionalità di rigidità e rapidità di risposta di tutto l'asservimento. Grazie alla tecnologia digitale, che ha permesso di ampliare moltissimo sia la quantità che il tipo di informazioni trasmesse tra CNC ed azionamento, si sono potuti realizzare algoritmi di regolazione specifici per l'Alta Velocità in modo da ampliare la banda passante del sistema controllo-azionamento motore e poter impostare via software reti correttive personalizzabili sulla specifica applicazione in modo tale da poter garantire la massima continuità del comando.

Avere continuità di comando nella descrizione di una traiettoria significa minimizzare le accelerazioni e le variazioni di accelerazione e quindi le oscillazioni indotte sulla macchina, tutto a vantaggio della velocità di esecuzione, precisione e qualità di finitura superficiale del pezzo.

Elettromandrino

Nelle lavorazioni ad Alta Velocità gli elettromandrini svolgono un ruolo molto importante in quanto sono l'elemento che deve riuscire a compendiare elevata velocità di rotazione, assenza di vibrazioni, sufficiente coppia ai bassi numeri di giri, elevata rigidità e stabilità termica.

Nelle macchine utensili tradizionali il mandrino era costituito da un gruppo rotante mosso da una serie di ingranaggi con cambio meccanico ed azionato da un motore trifase. Mandrini siffatti potevano fornire elevate coppie di lavoro a bassi giri, potendo sfruttare tutta la potenza del motore a coppia costante unita ad un opportuno rapporto di riduzione ottenuto con il cambio. La loro grande limitazione era di non poter raggiungere un elevato numero di giri, il loro limite era di 8.000 massimo 10.000 giri, ed a queste velocità presentavano notevoli problemi di riscaldamento del gruppo ingranaggi, quindi di tutto il RAM con conseguente usura degli stessi e derive termi-

As you can see from the diagram, in a very short space of time (of the order of milliseconds) the amount of data that must be exchanged between CNC, motor drive and transducers is very high. Only with numerical type information is it possible to correct in the best way the behaviour of each component in order to reach peak performances on the piece being worked.

In recent years, a lot of work has been done on the improvement of the functions of stiffness and rapidity of response of the whole server unit. Digital technology has allowed us to greatly increase both the quantity and the type of information transmitted between TNC and drive. Thus we have been able to create control algorithms specifically for high speed in order to increase the band-pass of the control system - drive-motor, and to be able to set up through software, correcting networks tailored to the specific application, in order to be able to ensure maximum continuity of control.

Having continuity of control in describing the path means minimising the accelerations and variations of acceleration, and so the oscillations induced on the machine, all of which improves the speed of execution, precision and quality in surface finish of the piece.

Electrospindle

In high speed milling, the electrospindle have an important role to play since they are the element that combines high rotation speed, absence of vibrations, sufficient torque at low revs, great stiffness and thermal stability. In traditional machine tools, the spindle consisted of a rotating unit driven by a series of gears with mechanical change and powered by a three-phase motor. Such electrospindles could supply high torque at low revs, being able to use all the power of the motor at constant torque combined with a suitable reduction ratio obtained with the gears. Their big drawback was not to be able to reach a high number of revs. Their limit was 8000, or a maximum of 10000 revs. At this speed, there were considerable problems of heating of the gear unit, and so of the whole RAM, with consequent wear of these and thermal drift of the machine.

The technological development of components, such as

che della macchina. Lo sviluppo tecnologico di componenti, quali ad esempio cuscinetti ibridi, motori trifase con azionamenti vettoriali, sistemi di lubrificazione, ecc... ha permesso agli elettromandri di svilupparsi notevolmente e porsi oggi come elemento fondamentale nelle macchine utensili per lavorazioni ad Alta Velocità. Andiamo adesso ad esaminare l'elettromandrino da due punti di vista: quello prestazionale e quello costruttivo. Dal punto di vista prestazionale l'elemento discriminante per l'elettromandrino è il grafico di coppia / potenza.

hybrid bearings, three-phase bearings with vector action, lubrication systems, etc. has allowed electrospindle to be notably developed, and to be considered as one of the fundamental parts of the machine tool for high speed milling. Let's move on to consider the electrospindle from two points of view: the performance and the construction. From a performance standpoint, the discriminating element for the electrospindle is the torque/power graph.

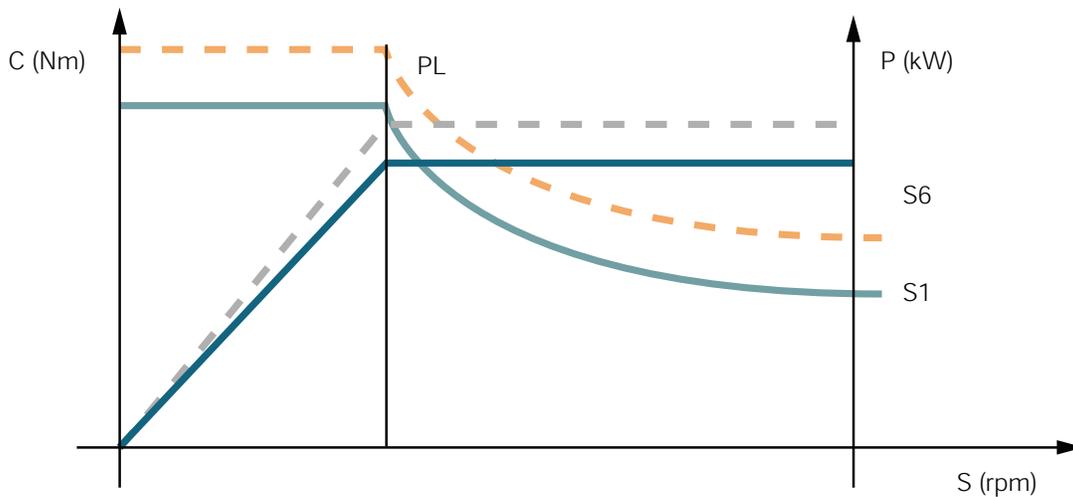


Fig. 31: Curva caratteristica di un elettromandrino

Fig. 31: Characteristics curve for a electrospindle

Un elettromandrino per Alta Velocità deve avere una coppia continuativa costante sufficientemente elevata, normalmente parte da 30-50 Nm per arrivare fino ai 100-150 Nm, da velocità praticamente nulle fino al punto in cui raggiunge la potenza costante detto anche Punto Leonard.

Questo punto è infatti il punto in cui il motore fornisce le massime prestazioni in termini di coppia e potenza. Il punto Leonard può variare in funzione della costruzione del motore e quindi delle caratteristiche che deve avere l'elettromandrino. Normalmente varia da 1.000-1.500 rpm per elettromandri che forniscono una elevata coppia ai bassi giri, a 4.000-5.000 rpm per elettromandri che mantengono una coppia costante fino ad elevate velocità. La velocità massima degli elettromandri per Alta Velocità va dai 15.000 rpm per arrivare fino a 30.000-40.000 rpm in funzione delle applicazioni. Per dare un'idea dei campi d'impiego ottimali degli elettromandri potremo definire la seguente classificazione.

An electrospindle for high speed milling must have a constant continuous torque which is sufficiently high, normally starting at 30-50 Nm and going up to 100-150 Nm, with a speed of virtually nothing up to the point where it reaches a constant power, also known as the Leonard Point.

This point is in fact the point where the motor provides maximum performance in terms of torque and power. The Leonard Point can vary depending on the construction of the motor, and so on the specifications that the electrospindle must have. Normally, it varies from 1000 to 1500 rpm, for electrospindle that provide high torque at low revs, to 4000 to 5000 rpm for electrospindle that maintain a constant torque up to a high speed.

The maximum speed of electrospindle for high speed work varies from 15000 rpm up to 30000 or 40000 rpm, according to the applications. To give an idea of the optimal ranges of use of the electrospindle, we could lay down the following classification.

Coppia Continuativa (Nm)	Velocità Massima (rpm)	Applicazione Lavorazioni ad Alta Velocità	Continuous torque (Nm)	Maximum speed (rpm)	Application High speed working
100 - 150	15.000 - 18.000	Elettromandrino universale in grado di eseguire sgrossatura di potenza su acciaio (profondità di passata 3-4 mm) e finitura. Ottimo anche per lavorazioni su tutti gli altri materiali	100 - 150	15.000 - 18.000	Universal electrospindle able to carry out powered rough-machining on steel (depth of run 3-4 mm) and finishing. Also ideal for working on all other materials.
30 - 60	20.000 - 30.000	Elettromandrino per sgrossatura con passate ridotte su acciaio (profondità di passata 1-2 mm), universale per alluminio ed altri materiali più teneri in grado di eseguire superfinitura.	30 - 60	20.000 - 30.000	electrospindle for rough-machining with limited runs on steel (depth of pass 1-2 mm), universal for aluminium and other softer materials able to carry out superfinituring.
5 - 10	40.000 - 45.000	Elettromandrini specifici per operazioni di superfinitura, lavorazione di leghe leggere e grafite.	5 - 10	40.000 - 45.000	electrospindles specifically for superfinituring operations, work on light alloys and graphite.

Fig. 32: Campi di applicazione elettromandrini

Altra cosa molto importante nella definizione dell'elettromandrino è il Fattore di Servizio indicato generalmente con la lettera S seguita da un numero che può essere 1, 3 o 6. Il fattore di servizio indica praticamente il tipo di utilizzo per cui è stato dimensionato l'elettromandrino, in particolare:

S1 = Servizio continuo, indica che l'elettromandrino può fornire le caratteristiche indicate dalle curve lavorando senza interruzione ventiquattro ore su ventiquattro.

S3 = Servizio intermittente al 30%, indica che l'elettromandrino può fornire le caratteristiche indicate dalle curve lavorando continuativamente con un ciclo in cui il mandrino è impegnato solo per il 30% del tempo.

S6 = Servizio intermittente al 60%, indica che l'elettromandrino può fornire le caratteristiche indicate dalle curve lavorando continuativamente con un ciclo in cui il mandrino è impegnato solo per il 60% del tempo.

Questo fa capire che quando si leggono le prestazioni di una macchina, bisogna fare molta attenzione a come i dati vengono forniti, perché è chiaro che le prestazioni di un servizio S3 saranno sicuramente superiori a quelle di un servizio S1, però bisogna che la macchina poi lavori realmente in S3, altrimenti il mandrino si deteriora rapidamente.

Dal punto di vista costruttivo possiamo considerare l'elettromandrino costituito fondamentalmente dai seguenti gruppi:

- Corpo esterno
- Motore (Rotore-Statore)
- Cuscinettamento
- Gruppo di bloccaggio-sbloccaggio utensile
- Tenute

Fig. 32: Application fields of electrospindles

Another very important factor in defining the electrospindle is the Service factor, generally indicated with the letter "S" followed by a number, which can be 1, 3 or 6. In practice, the service factor shows the type of use for which the electrospindle has been designed, thus:

S1 = Continuous service, indicates that the electrospindle can provide the characteristics indicated by the curves, working without interruption 24 hours a day.

S3 = 30% intermittent service, indicates that the electrospindle can provide the characteristics indicated by the curves, working continuously with a cycle in which the electrospindle is only used for 30% of the time.

S6 = 60% intermittent service, indicates that the electrospindle can provide the characteristics indicated by the curves, working continuously with a cycle in which the electrospindle is only used for 60% of the time.

This shows you that when you read the performance ratings for a machine, you have to pay close attention as to how the data is supplied. It is clear that the performance of a service rated S3 will definitely be higher than that of one rated S1. However it is necessary for the machine to actually work in S3, otherwise the electrospindle will deteriorate rapidly.

From a constructional point of view, we can consider the electrospindle as constructed of the following units:

- External body
- Motor (Rotor-Stator)
- Bearings
- Tool-holding - release unit
- Seals

Il corpo esterno costituisce la struttura portante dell'elettromandrino mediante la quale viene riferito e fissato alla macchina. Al suo interno viene realizzato il circuito di termostatazione che serve per mantenere l'elettromandrino a temperatura costante smaltendo il calore prodotto dal motore e dagli altri organi in movimento, evitando dilatazioni e variazioni dimensionali dello stesso, garantendo quindi una maggiore precisione durante la lavorazione.

Il motore è il componente che determina le prestazioni dell'elettromandrino. Lo statore viene fissato all'interno del corpo dell'elettromandrino, mentre il rotore viene calettato sull'albero. Il gruppo rotore albero è uno dei componenti più critici da realizzare in quanto il collegamento meccanico tra i due componenti deve essere in grado di garantire, con margini di sicurezza elevati, la trasmissione di tutta la potenza fornita dal motore sull'utensile in lavorazione senza possibilità di slittamento.

Al contempo, viste le elevate velocità di rotazione, deve essere perfettamente equilibrato garantendo l'assenza di vibrazioni, che risulterebbero dannose per lo stesso elettromandrino, portando i cuscinetti ad un rapido deterioramento, e per la qualità finale della lavorazione. Nella parte anteriore dell'albero è ricavata la sede per l'alloggiamento del cono portautensile.

Il cuscinettamento assolve fundamentalmente due compiti:

- garantire l'adeguata velocità di rotazione dell'albero con la dovuta rigidità e precisione geometrica.
- garantire assenza di giochi e vibrazioni
- garantire l'adeguata resistenza agli sforzi di lavorazione.

Nell'applicazioni per Alta Velocità oggi vengono utilizzati cuscinetti ibridi con sfere in ceramica e piste in acciaio per garantire prestazioni di velocità e carico notevolmente superiori ad equivalenti cuscinetti di tipo tradizionale.

I cuscinetti sono lubrificati a vita con grassi speciali oppure con nebulizzazione di aria-olio. Il gruppo di bloccaggio-sbloccaggio utensile nella sua semplicità può essere visto come un'altra macchina all'interno dell'elettromandrino. Solidale in rotazione con il gruppo albero-rotore, ma scorrevole al suo interno, è costituito nella parte anteriore dalla pinza di presa del cono portautensile azionata in chiusura da un gruppo di molle a tazza. Nella parte posteriore presenta il cilindro idraulico di sbloccaggio ed il distributore rotante che permette di far passare al suo interno il liquido per la refrigerazione utensile e l'aria per la pulizia del cono.

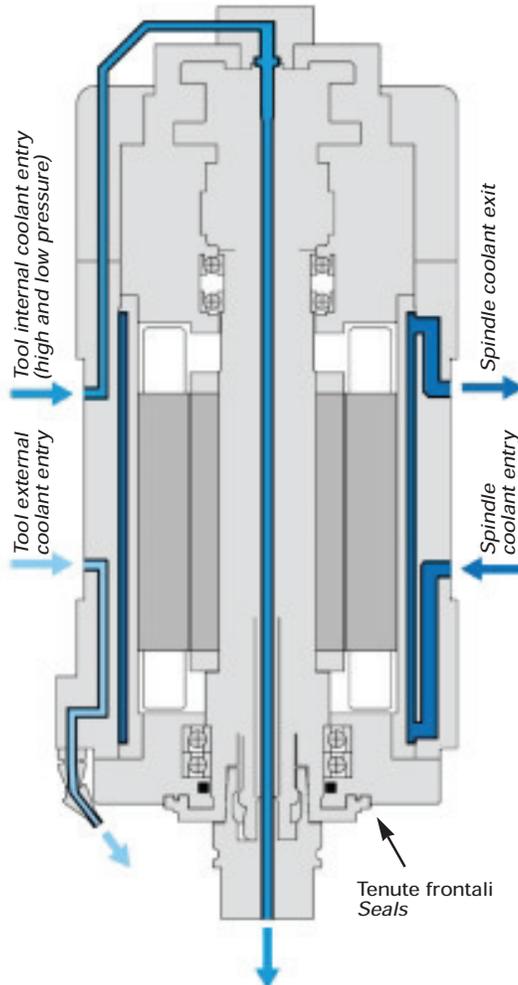


Fig. 33: Spaccato di elettromandrino
Cutaway illustration of electrospindle

The external body consists of the support structure of the electrospindle, to which the machine is fixed. Inside is installed the thermostatic control circuit that is used to keep the electrospindle at a constant temperature, by dissipating the heat produced by the motor and by the moving parts, thus avoiding expansion and variations in its dimensions, and so ensuring greater precision during working.

The motor is the component that determines the performance of the electrospindle. The stator is fixed to the inside of the electrospindle body, while the rotor is keyed onto the shaft. The shaft rotor unit is one of the most critical components to be built, since the mechanical connection between the two components must be able to ensure, with high safety margins, the transmission of all the power provided by the motor to the tool when working, without any chance of it slipping. At the same time, given the high rotation speed, it must be perfectly balanced, to ensure the absence of vibration, which could damage the electrospindle

itself, causing the bearings to wear fast, and to ensure the final quality of the working. The housing for the tool-support cone is built into the front part of the shaft

The bearing fulfils two functions:

- ensuring the shaft rotates at an adequate speed with the required stiffness and geometrical precision, and free of play and vibration,
- ensuring an adequate resistance to the stresses of working.

In high-speed applications today, hybrid bearings are used, with ceramic balls and steel races, to ensure ratings for speed and load that are considerably higher than equivalent bearings of the traditional type. The bearings are lubricated for life with special grease, or with air-oil atomisation.

The tool locking-unlocking unit, in its simplicity, can be seen as another machine inside the electrospindle. Fixed to rotate with the shaft-rotor unit, but moving inside it, it is fitted in the front of the grippers for holding the tool-support cone, activated for closing by a cup-spring unit. Meanwhile the rear part houses the hydraulic release cylinder and the rotary distributor, that allows liquid to run into the interior to cool the tool and the air to clean the cone.

Generalmente nella impostazione di un elettromandrino si è quasi portati a dimenticare il gruppo delle tenute, in quanto come primo impatto si dà principalmente importanza agli aspetti di dimensionamento elettro-meccanico. Il gruppo tenute invece, anche se in sordina, è quello che è preposto a garantire l'affidabilità dell'elettromandrino durante la sua vita operativa. I nemici principali di questo componente sono infatti l'acqua e lo sporco che possono penetrare al suo interno sia dalla parte anteriore che da quella posteriore, attraverso gli interstizi naturalmente presenti tra parte fissa e parte rotante. Ogni costruttore ha sviluppato delle proprie soluzioni, ma fondamentalmente due sono i concetti da tenere presenti:

- Centrifugazione verso l'esterno dei liquidi che vengono in contatto con le parti rotanti.
- Pressurizzazione dell'interno dell'elettromandrino in modo tale che ci sia un continuo flusso di aria verso l'esterno del gruppo e quindi si eviti l'ingresso di aria umida e comunque sporca.

Controllo Numerico

Le lavorazioni ad Alta Velocità non esigono solo un più rapido spostamento degli assi od una più veloce rotazione del mandrino, ma soprattutto una serie di specifiche funzioni software ed un rapidissimo scambio di dati tra le varie unità del controllo numerico che prendono parte alla gestione sia della macchina che della lavorazione. Eseguire lavorazioni ad Alta Velocità significa, per il controllo numerico, riuscire a combinare le esigenze di precisione richieste con quelle di una rapida esecuzione. Nella programmazione tradizionale di una traiettoria, la curva geometrica del profilo è approssimata da segmenti lineari, all'estremità di ciascuno dei quali il CNC deve far rallentare e cambiare bruscamente la velocità e la direzione di movimento dell'utensile per rimanere all'interno della tolleranza assegnata al profilo da eseguire. Per fare questo il CNC utilizza al suo interno alcune funzioni quali ad es. i Kv, i Guadagni degli assi, il Feed Forward ecc... Mentre Kv e Guadagni sono parametri definiti per ottimizzare le caratteristiche globali di macchina e controllo, il Feed Forward invece è una funzione che interviene dinamicamente durante l'esecuzione del pezzo. Questa regola automaticamente la velocità degli assi in funzione della traiettoria da seguire facendo sì che il profilo eseguito rimanga sempre dentro la tolleranza richiesta. Come semplice esempio possiamo prendere in considerazione l'esecuzione di uno spigolo.

In prossimità dello spigolo a causa dell'inerzia della macchina e dei tempi di risposta dell'elettronica, senza nessun controllo il profilo percorso sarebbe quello evidenziato in rosso e l'errore commesso sul profilo del pezzo risulterebbe veramente eccessivo, anche dell'ordine di qualche millimetro. Il Feed Forward in questo caso, controllando l'errore

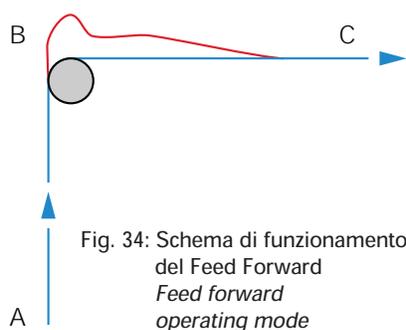


Fig. 34: Schema di funzionamento del Feed Forward
Feed forward operating mode

Generally in setting up the electrospindle, it is easy to almost forget the unit of seals, since we primarily consider the electro-mechanical design aspects to be more important. The seal unit however, even if it is less important, is designed to ensure the reliability of the electrospindle during its operational life. The main causes of problems for this component are water and dirt that can penetrate inside it, both at the front and at the back, through the gaps naturally present between the fixed part and the rotating part. Each manufacturer has developed its own solutions, but basically there are two concepts to consider:

- Centrifugal forces towards the outside of liquids that come into contact with the rotating parts,
- pressurisation of the inside of the electrospindle so that there is a continuous flow of air towards the outside of the unit, and so humid air and any dirt is prevented from entering.

Numerical control

High speed milling does not only require a fast movement of the axes or a faster rotation of the electrospindle, but also a series of specific software functions and very fast interchange of data between the various units of the numerical control that take part in the running both of the machine and of the working. Carrying out high-speed work involves, for the numerical control, being able to combine the requirements for precision with that of rapid execution. In traditional programming of a path, the geometric curve of the profile is approximated by linear segments, at the end of each of which the CNC must slow down and change abruptly the speed and direction of tool movement, to stay within the tolerances allowed for the profile to be produced. To do this, the CNC uses inside it some functions such as the kv, the gain of the axes, the Feed Forward, etc. While the kv and the gain are parameters defined to optimise the overall characteristics of machine and control, the Feed Forward is a function that triggers dynamically during the execution of the piece. This automatically controls the speed of the axes according to the path to be followed, making sure that the profile produced is always within the required tolerances. As a simple example, we can consider the execution of a corner.

Near the corner, due to the inertia of the machine and the response time of the electronics, without any control, the profile could be that shown in red, and the error made on the profile of the piece would be really excessive, even in the order of some millimetres. The Feed Forward in this case, by checking the error made in its path, according to the gains and the kv

commesso sulla traiettoria, in funzione dei guadagni e dei Kv impostati, calcola la velocità massima ammissibile lungo la traiettoria per far sì che l'errore del profilo rimanga nella tolleranza stabilita. In questo caso otterremo il profilo azzurro. Questa funzione è fondamentale nelle operazioni di semifinitura e finitura per garantire la precisione del profilo richiesta, mentre nelle operazioni di sgrossatura può essere disattivata per privilegiare la velocità di esecuzione della lavorazione.

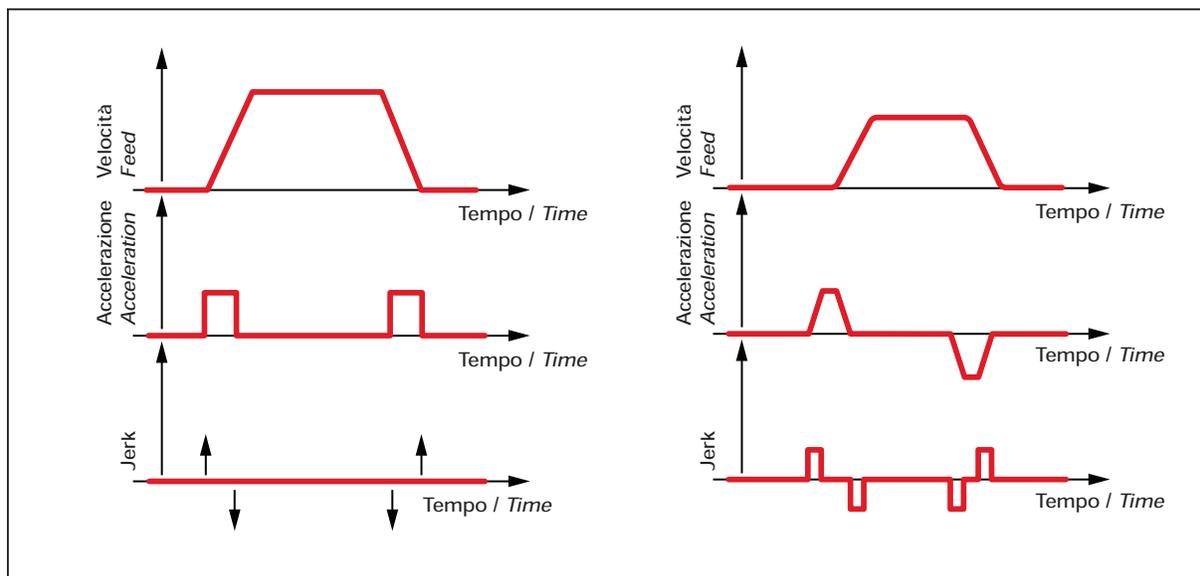
L'approssimazione di curve mediante profili discontinui mette in evidenza, oltre alla precisione di esecuzione del profilo, altri problemi legati alla dinamica della lavorazione. Infatti ogni brusco cambiamento di traiettoria significa anche brusca variazione di velocità e di accelerazione, che si traducono in sollecitazioni della macchina che a loro volta incidono sia sulla durata degli organi cinematici della macchina stessa, sia sulla qualità di finitura del particolare. Per compensare questi fenomeni sui moderni CNC per Alta Velocità è stata introdotta la funzione di Jerk Control ossia di controllo della variazione dell'accelerazione. Questa funzione, durante il cambio di traiettoria, permette di ottenere l'applicazione dell'accelerazione non più in modo repentino, ma graduale. Nella figura successiva si illustrano graficamente i due diversi sistemi di controllo.

set, calculates the maximum speed permissible along the path to ensure that the error on the profile stays within the tolerances established. In this case, we would obtain the profile shown in blue.

This function is fundamental in the operations of semifinishing and finishing to ensure the precision of the required profile, while in rough-machining operations, it can be deactivated to improve the speed of execution of the work.

The approximation of curves through discontinuous profiles shows up, as well as precision in executing the profile, other problems connected with the dynamics of working. In fact, any brusque change in the path, also means sharp changes in speed and acceleration, that leads to stress on the machine, which in turn affects the lifespan of the kinematic parts of the machine itself, and the finished quality of the part.

To compensate for these phenomena, on the modern high-speed CNC a function called jerk control has been introduced to control the variations in acceleration. This function, during changes in path, allows the acceleration to be made gradually, instead of suddenly, as it used to be. In the illustration below, the two different control systems are shown.



Controllo senza Jerk Control
Control without Jerk Control

Controllo con Jerk Control
Control with Jerk Control

Fig. 35: Confronto tra controllo senza / con Jerk Control
Comparison between without / with Jerk Control

Nell'operazione di finitura di superfici sculturate è molto importante che le traiettorie generate dal controllo numerico in entrambi i sensi di lavorazione siano il più uguali possibile perché altrimenti si possono generare errori sul profilo ben visibili anche all'occhio umano. Se una traslazione della traiettoria nel piano X-Y è generalmente poco avvertibile ed influente per la finitura del pezzo non è altrettanto vero per una traslazione nel piano verticale. La finitura corretta di una superficie deve presentare infatti tutta una serie di solchi paralleli e di uguale larghezza per entrambe le direzioni di lavorazione. Se le tarature degli assi non sono corrette o le traiettorie generate non sono uguali si noteranno sulla superficie i cosiddetti incroci che in realtà derivano dalla diversa altezza di lavoro dell'utensile in punti adiacenti.

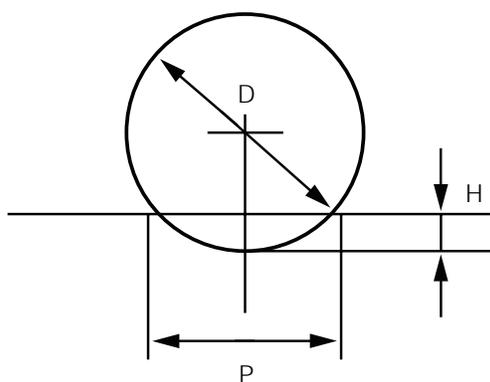


Fig. 36: Profondità di passata ed incroci nella finitura

In the finishing operations for sculptured surfaces, it is very important that the paths generated by the numerical control, in both working directions, are as equal as possible, since otherwise errors can be generated on the profile, which are easily visible, even to the naked eye. If a translation of the path in the X-Y plane is generally hardly noticeable and influential on the finish of the piece, the same is not true for a translation in the vertical plane. The correct finish of a surface must in fact have a series of parallel grooves and equal width for both the working directions. If the settings of the axes are not correct or the paths generated are not equal, you will notice surfaces that are known as crossed, that in fact derive from the different working heights of the tool in adjacent points.

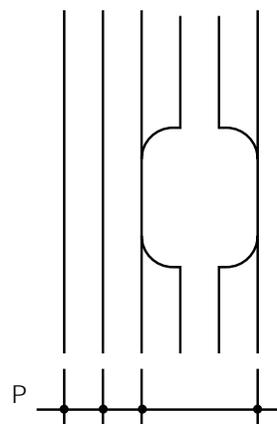
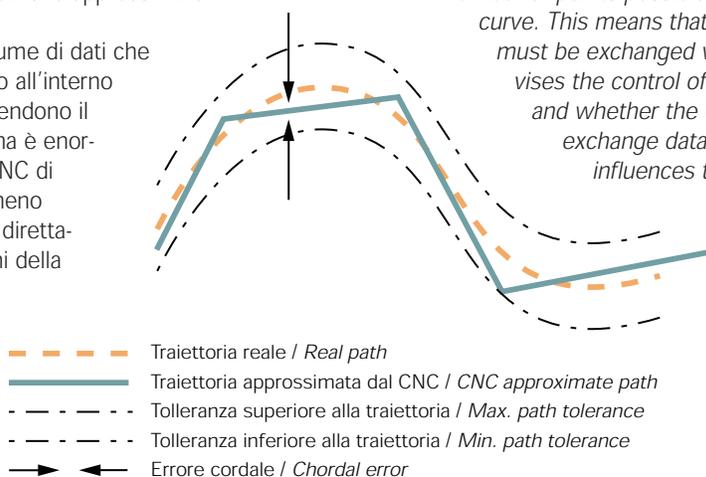


Fig. 36: Depth of run and crosses in finishing

Se P è piccolo rispetto a D, si può considerare $H = P^2/(4 \cdot D)$. Con questa formula si può quindi calcolare con buona approssimazione anche l'errore commesso in Z. Per quanto finora detto, la generazione di traiettorie continue ed uguali per punti adiacenti è fondamentale nei controlli numerici per Alta Velocità. Per ottenere questo, secondo la tradizionale logica di approssimazione, si cerca quindi già dal CAM di avere il maggior numero di punti possibili che approssimino la curva. Questo fa sì che il volume di dati che deve essere scambiato all'interno delle unità che sovrintendono il controllo della macchina è enorme e la capacità del CNC di scambiare dati più o meno velocemente influisce direttamente sulle prestazioni della macchina.

If "P" is small compared to D, you can take $H = P^2/(4 \cdot D)$. With this formula, you can then calculate with a good approximation even the error committed in Z. As far as we have said, the generation of continuous runs, equal for adjacent points, is fundamental in the numerical controls for high-speed milling. To obtain this, according to traditional approximation logic, we therefore try to get from the CAM the highest number of points possible that approximate to the curve. This means that the volume of data that must be exchanged within the unit that supervises the control of the machine is enormous, and whether the CNC has the capacity to exchange data fast or not directly influences the performance of the machine.



- Traiettoria reale / Real path
- Traiettoria approssimata dal CNC / CNC approximate path
- - - - - Tolleranza superiore alla traiettoria / Max. path tolerance
- - - - - Tolleranza inferiore alla traiettoria / Min. path tolerance
- ← Errore cordale / Chordal error

Fig. 37: Approssimazione cordale di una traiettoria

Fig. 37: Example of chordal approximation on a path

Al fine di fare una esemplificazione basta pensare che per ottenere una buona finitura superficiale, evitare sfaccettature visibili, segni di vibrazione sul pezzo e mantenere quindi un'elevata precisione e finitura del particolare la risoluzione deve essere molto alta, valori tipici di distanza tra due punti vanno da 2 a 20 μm e quindi il numero di blocchi che il CNC deve eseguire è elevatissimo.

Considerando che il tempo minimo per l'esecuzione di un blocco per i moderni CNC si aggira intorno ad 1 ms (un millisecondo) e che un blocco consiste di circa 250 bit i dati che devono essere scambiati all'interno del CNC sono di 250.000 bit/s.

Ridurre il carico di lavoro del CNC ed ottenere la migliore approssimazione possibile della curva è quindi un obiettivo molto importante da raggiungere. Per questo motivo ultimamente si sta affermando sempre più nei CNC l'utilizzo di funzioni matematiche denominate NURBS (Non Uniform Rational B-Spline). Senza entrare nella trattazione rigorosa dell'argomento, ma comunque per capire il loro modo di funzionamento si può dire che data una serie di punti lungo una traiettoria è definito quindi anche il poligono che approssima la traiettoria stessa, la generazione della NURBS che ricostruisce la curva è legata per ogni punto della spezzata a due parametri fondamentali: il nodo K_j ed il peso R_j . La funzione del nodo è quella di guidare l'interpolazione sulla curva, ovvero gestire in modo opportuno la distribuzione dei nodi permette una miglior descrizione della curva, mentre il peso descrive quanto ogni punto e quindi ogni nodo è in grado di attrarre la curva stessa. È facile quindi intuire che algoritmi che distribuiscano nodi ed attribuiscono pesi in modo opportuno, riescano a generare una curva continua molto aderente a quella reale. Infatti un'importante caratteristica delle NURBS sta proprio nel fatto di riuscire a generare curve che si adattano morbidamente al poligono di controllo. Ne deriva quindi che l'utilizzo di queste curve, generando profili continui, limita automaticamente i Jerk e quindi le sollecitazioni sulla macchina migliorando la qualità di finitura superficiale del pezzo.

Rendere più veloce la macchina nell'esecuzione delle traiettorie, può essere ottenuto, oltre che aumentando le potenzialità di calcolo, permettendo al controllo numero di lavorare direttamente sulle curve NURBS utilizzate dal CAM per generare le traiettorie di lavorazione.

Così facendo è possibile eliminare, per una determinata tolleranza di esecuzione del profilo, un gran numero di blocchi di programmazione CN.

Infatti utilizzando direttamente le NURBS, il CNC gestirà una funzione matematica e non più una serie di segmenti piccolissimi che approssimano la stessa funzione a loro volta da interpolare.

Poiché la tecnologia NURBS si basa su movimenti non lineari, i percorsi utensili così generati hanno transizioni continue e quindi il CNC mantiene velocità d'interpolazione, accelerazioni e decelerazioni significativamente più elevate rispetto al metodo con approssimazione cordale della traiettoria evitando nel contempo forti variazioni delle forze di taglio e della dinamica dell'utensile che si ripercuotono negativamente sia sulle condizioni di taglio che sulla qualità del pezzo finito.

In order to take an example, it is enough to remember that to obtain a good surface finishing, avoid visible faceting, signs of vibration on the piece, and so keep high precision and finish of the part, the resolution must be very high. Typical values for the distance between the two points vary from 2 to 20 μm , and so the number of blocks that the CNC must carry out is very high indeed. Considering that the minimum time to carry out one block for modern CNC's is about 1 ms (one millisecond) and that a block consists of about 250 bits, the data that must be exchanged inside the CNC are 250,000 bits/sec.

Reducing the work load on the CNC and obtaining the best possible approximation of the curve is therefore a most important objective to be reached. For this reason, recently more and more often in the CNC, mathematical functions called NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) are used. Without going into this too deeply, but just to help understand the way it operates, we can say that given a series of points along a path, and therefore having defined the polygon that approximates the path itself, the generation of the NURBS that reconstructs the curve is joined for each point of the dotted line to two fundamental parameters: the node K_j and the weight R_j . The function of the node is to guide the interpolation on the curve, or in other words, suitably managing the distribution of the nodes allows a better description of the curve, while the weight describes how much each point, and so each node, is able to pull in the curve itself. It is easy to understand therefore that algorithms that distribute nodes, and suitably attribute weights, manage to generate a continuous curve which is very close to the real one. In fact, an important characteristic of the NURBS is actually the fact that it manages to generate curves that adapt easily to the control polygon. From this you can deduce that the use of these curves, generating continuous profiles, limits automatically the "jerks", and so the stresses on the machine, improving the quality of the surface finishing of the piece.

We can make the machine faster in executing paths, as well as by increasing the calculation power, by allowing the numerical control to work directly on the NURBS curves used by the CAM to generate work paths. By doing this, it is possible to eliminate, for a certain execution tolerance of the profile, a good number of NC programming blocks.

In fact, by using the NURBS directly, the CNC will carry out a mathematical function and no longer a series of very small segments that approximate the same function, in turn, to be interpolated.

Since NURBS technology is based on non-linear movements, the tool paths thus generated have continuous transitions, and therefore the CNC maintains interpolation speed, accelerations and decelerations which are significantly higher compared to the method with chordal approximation of the path, at the same time avoiding strong variations in the cutting forces and in the dynamics of the tool that have a negative effect both on the cutting conditions and on the quality of the finished piece.

L'incremento di produttività può variare dal 20% al 50% e migliore è il livello qualitativo della meccanica della macchina migliore è la precisione dimensionale, geometrica e la finitura superficiale del pezzo.

Attraverso la tecnologia NURBS oltre ai dati della traiettoria è possibile programmare anche la velocità di taglio e di rotazione del mandrino in modo tale da mantenere lungo il percorso condizioni di taglio ottimali.

Nella figura seguente viene messa a confronto la velocità di avanzamento in lavorazione con programmazione NURBS rispetto a quella ottenibile con programmazione convenzionale. Come si può notare la programmazione NURBS, generando movimenti continui, dà luogo a condizioni di taglio ottimali e minori sollecitazioni dinamiche sulla macchina e sull'utensile, che si traducono in una migliore qualità del pezzo lavorato.

Increase in productivity can vary from 20% to 50%.

The better the level of quality of the mechanics of the machine, the better is the dimensional precision, geometry and the surface finishing of the piece.

Through NURBS technology, as well as the data of the path, it is possible to also program the cutting speed and the electrospindle rotation speed, so as to maintain optimum cutting conditions along the path.

In the following figure, the operational feed speed with NURBS programming is shown compared to that obtainable with conventional programming. As you can see, the NURBS programming, by generating continuous movements, gives rise to optimum cutting conditions and less dynamic stress on the machine and on the tool, which means better quality of the finished workpiece.

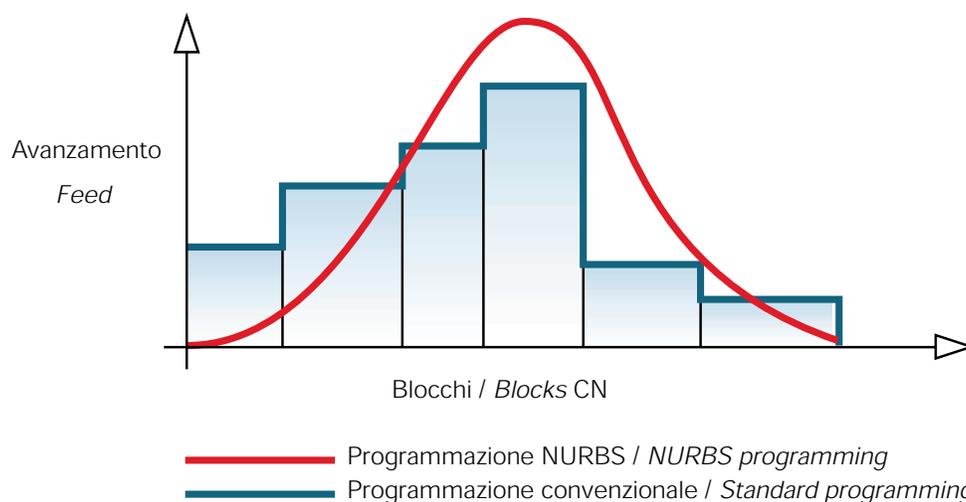


Fig. 38: Avanzamento della macchina con i due tipi di programmazione

Fig. 38: Machine feed with the two types of programming

Altra funzione del CNC molto importante nella esecuzione di superfici sculturate ad alta velocità è la funzione di Look Ahead.

Questa permette al controllo numerico di analizzare in anticipo, rispetto alla loro esecuzione, un certo numero di blocchi di percorso utensile in modo tale da poterne ottimizzare l'esecuzione. Nelle lavorazioni ad Alta Velocità è fondamentale che i controlli numerici abbiano una funzione di Look Ahead potente, capace di analizzare molti blocchi CN e che quindi riescano a capire il tipo di traiettoria che la macchina dovrà percorrere ed ottimizzare sia il percorso che i parametri dinamici per garantire le tolleranze richieste. Oggi i controlli più evoluti riescono ad avere fino a 1024 blocchi di Look Ahead. Per sfruttare al massimo questa potenzialità è però importante che il controllo abbia anche una elevata potenza di calcolo per non rallentare le altre funzioni a cui deve sovrintendere.

Another very important function of the CNC in executing sculptured surfaces at high speed is the Look Ahead function.

This allows the numerical control to analyse in advance, with respect to their execution, a certain number of tool path blocks so as to be able to optimise the execution. In high-speed milling, it is essential that the numerical controls have a powerful Look Ahead function, capable of analysing several NC blocks, and then manages to understand the type of path that the machine must travel and optimise both the path and the dynamic parameters to ensure the required tolerances are met. Today the most sophisticated controls can have up to 1024 Look Ahead blocks. To take maximum advantage of this potential, it is however important that the control also has a high calculation power so as not to slow down the other functions which it must supervise.

Altra funzione molto importante nelle lavorazioni ad Alta Velocità soprattutto se si utilizzano macchine a cinque assi continui è quella di TCPM (Tool Center Point Management).

Another very important functions in high-speed working, especially if machines with five continuous axes are used, is TCPM (Tool Centre Point Management).

Con questa funzione il controllo numerico riesce a mantenere il corretto orientamento tra utensile e pezzo anche durante la rotazione degli assi della testa o della tavola. Grazie a questa funzione è anche possibile impostare e mantenere angoli di contatto tra utensile e pezzo diversi da quello corrispondente alla normale della superficie per ottimizzare le condizioni di taglio dell'utensile e quindi migliorare il grado di finitura della lavorazione. Un utensile sferico infatti presenta al suo centro una velocità di taglio nulla che durante la lavorazione genera uno strappo del materiale con conseguente cattiva finitura del pezzo. Mantenere quindi l'utensile non perpendicolare alla superficie, ma inclinato di un certo angolo (5° - 10°) permette di evitare la zona di velocità nulla del tagliente e quindi avere una migliore finitura del pezzo e una maggiore velocità di avanzamento.

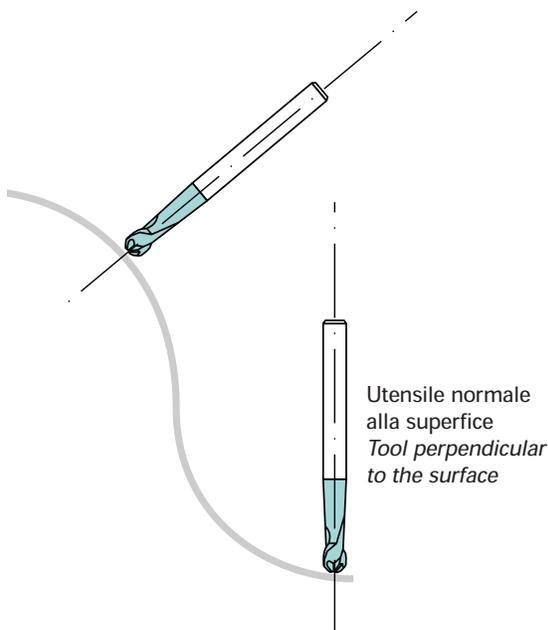


Fig. 39: Esempio della funzione TCPM

2.3 - Struttura degli utensili per Alta Velocità

Nella presente analisi come utensile consideriamo tutto ciò che partendo dal naso mandrino arriva a contatto con il pezzo da lavorare ed esegue l'asportazione del truciolo. In particolare troveremo tre componenti:

- Il portautensile
- Il corpo dell'utensile
- Il tagliente

Nel caso degli utensili integrali il corpo dell'utensile ed il tagliente saranno un unico pezzo, mentre negli utensili con inserti riportati il collegamento tra inserto e corpo assume un'importanza fondamentale nelle lavorazioni ad Alta Velocità.

With this function, the numerical control can maintain the correct orientation between tool and piece, even during the rotation of the axes of the head and the table.

Thanks to this function, it is also possible to set and maintain angles of contact between tool and piece different from those corresponding to the norm for the surface, to optimise the cutting conditions for the tool, and so improve the finishing standard of the work.

In fact, at the centre of a spherical tool the cutting speed is zero, and so during work this generates a tearing of the material with a resulting poor finishing of the piece. Therefore by keeping the tool off the perpendicular to the surface, but inclined at a certain angle (5° - 10°), you can avoid the zone of zero cutting speed, and so have a better finishing for the piece and a higher feed.

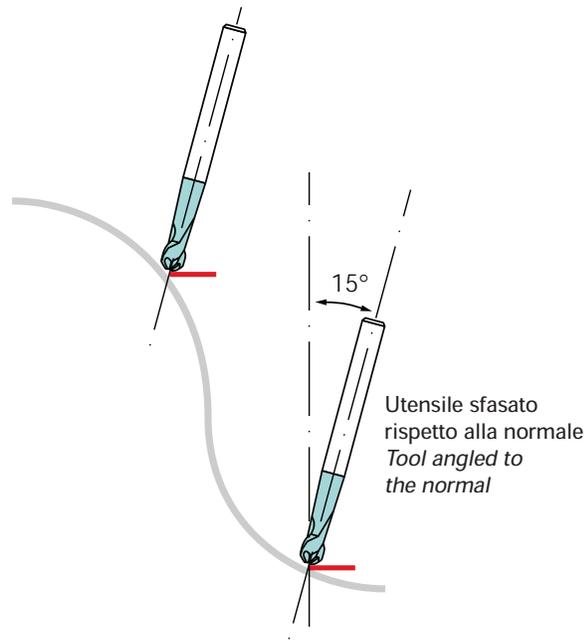


Fig. 39: Example of the TCPM function

2.3 - Structure of tools for high speed milling

In this analysis, we are considering the whole tool, which starting from the spindle nose, comes into contact with the piece to be worked and removes the chip.

We will find three components:

- The tool holder,
- The body of the tool,
- The cutting edge

In the case of integral tools, the body of the tool and the cutting edge are all one piece, while with tools that take an insert, the connection between insert and body has a fundamental importance for high-speed milling.

Il Portautensile

Il portautensile è l'elemento che nella catena ha il compito di assicurare la massima stabilità, rigidità e precisione di collegamento tra il corpo dell'utensile ed il mandrino, cioè la macchina utensile. Il portautensile può essere distinto fondamentalmente in due parti:

- l'attacco al mandrino
- la presa dell'utensile

Nelle macchine tradizionali l'attacco più diffuso è l'attacco di tipo ISO costituito fondamentalmente da un cono flangiato con all'estremità posteriore un codolo di presa.

The tool-holder

The tool holder is the element which has the job of ensuring maximum stability, stiffness and precision for the connection between the body of the tool and the electro-spindle, that is the machine tool. The tool holder can basically be divided into two parts:

- the connector to the electrospindle,
- the gripper for the tool.

In traditional machines, the most commonly used connector is the ISO type, which basically consists of a flanged cone with the hold at the bottom end.

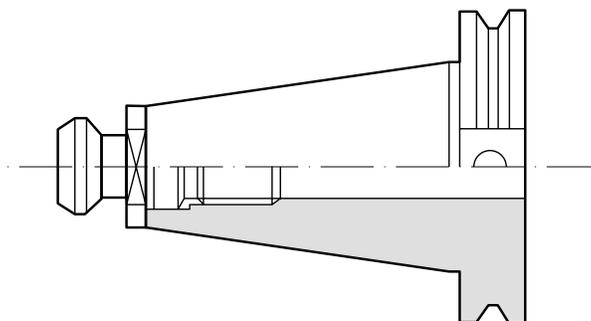


Fig. 40: Schema portautensile tipo ISO

Fig. 40: Illustration of ISO type tool-holder

Il fissaggio di questo tipo di attacco all'interno del naso del mandrino viene effettuato da una pinza di presa che tira il portautensile dentro un cono femmina realizzato dentro l'estremità dell'albero del mandrino. Il riferimento e bloccaggio di questo cono viene ottenuto su due settori di cono uno all'estremità anteriore ed uno all'estremità posteriore.

I limiti principali di questo tipo di attacco sono i seguenti:

- Scarsa ripetibilità del posizionamento del portautensile nella sede dovuta al fatto che il riferimento è realizzato tra due superfici coniche.
- Scarsa rigidità di collegamento perché affidata unicamente all'attrito di collegamento tra i due coni ed alla precisione geometrica di costruzione delle parti
- Alle alte velocità di rotazione la pinza di presa per forza centrifuga tende ad allentarsi e quindi a far perdere ancor più rigidità al collegamento.
- Non sufficiente precisione geometrica di collegamento per la rotazione alle alte velocità.
- Tendenza del portautensile ad incunearsi all'interno della sede con impossibilità di estrazione in fase di cambio utensile automatico.

Con l'avvento delle macchine per lavorazioni ad Alta Velocità è stato introdotto un nuovo tipo di attacco, HSK, studiato appositamente per garantire nelle lavorazioni ad Alta Velocità la massima precisione geometrica di collegamento, la massima rigidità e stabilità alle alte velocità, l'assenza di incuneamenti del portautensile nella sua sede.

The fixing of this type of connector inside the electro-spindle nose is carried out by a gripper that pulls the tool-holder inside a female cone made inside the end of the shaft of the electrospindle. The reference and locking of this cone is achieved on two cone sectors, one at the front end and one at the back end.

The main limitations of this type of connector are the following:

- Difficulty in positioning of the tool holder in the same place, due to the fact that the reference point is made between two conical surfaces.
- Poor stiffness of connection, since it relies only on the friction of connection between the two cones and on the geometrical constructional precision of the parts.
- At high rotation speeds, the gripper tends to slacken due to the centrifugal force, and so lose even more connection stiffness.
- Insufficient geometrical connection precision for high speed rotation.
- Tendency by the tool holder to wedge itself inside the housing, making it impossible to remove in the automatic tool-changing phase.

With the introduction of machine for high-speed milling, a new type of connector has been produced, the HSK, designed especially for high-speed work, to ensure maximum geometrical precision for the connection, maximum stiffness and stability at high speeds, and the tool-holder no longer becoming stuck inside its housing.

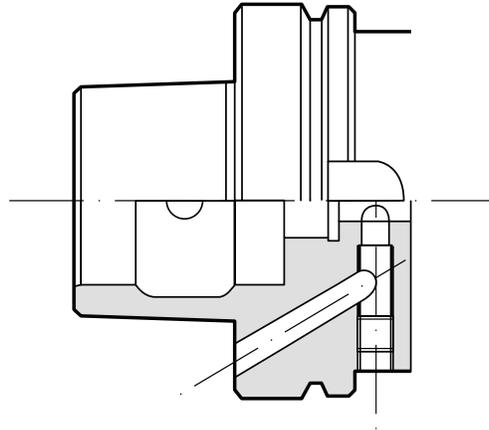


Fig. 41: Schema portautensile tipo HSK

Fig. 41: Diagram of HSK type tool-holder

Come possiamo vedere l'attacco tipo HSK a differenza dell'ISO fa riferimento con la sua sede su un piano frontale che garantisce un'ottima rigidezza ai momenti ribaltanti generati dalle forze di taglio, si centra su un riferimento cilindrico alla base del piano di appoggio, il che garantisce un'ottima precisione geometrica nell'accoppiamento, la pinza di presa agisce ad espansione all'interno del cono nella sua parte finale facendola deformare fino a portarla in contatto con la sede e garantendo la necessaria coppia di attrito. La pinza di presa agendo ad espansione, in lavorazione, grazie alla forza centrifuga che si sviluppa, tende ancor più ad espandersi e quindi ad aumentare il serraggio del portautensile nella sua sede, contrariamente a quanto succede con l'attacco tipo ISO.

Oggi attacchi HSK di precisione possono garantire delle eccentricità di rotazione dell'utensile rispetto alla sua sede di 3 µm per una lunghezza di tre-cinque volte il diametro dell'utensile.

Per capire la differenza sostanziale tra i due tipi di attacchi ad Alta Velocità dalla seguente tabella possiamo confrontare la percentuale di contatto tra cono e sua sede alle differenti velocità di rotazione tra un cono ISO ed uno HSK.

As you can see, the HSK type connector is different from the ISO in that it takes as a reference its housing on the front surface, which ensures optimum stiffness to the tilting moments generated by the cutting forces, centres itself on a reference cylinder at the base of the support surface. This ensures optimum geometrical precision when coupling, the gripper acts by expanding inside the cone at the end part, changing its shape so as to bring it into contact with the seating, and ensuring the necessary frictional torque. The gripper working by expansion, during machining, due to centrifugal force that develops, tends to expand even more, and so to increase the tightness of the tool-holder in its housing, as opposed to what happens with the ISO type connector.

Today, the precision HSK can guarantee a rotation eccentricity for the tool with respect to its seating of 3 µm for a length of three to five times the diameter of the tool.

To illustrate the substantial difference between the two types of high-speed connector, in the following table, you can compare the percentage of contact between cone and seating for the different rotation speeds, of the ISO cone and the HSK.

Rotazione Mandrino electrospindle rotation	Attacco ISO 40 ISO 40 taper	Attacco HSK 50A HSK 50A taper
0	100	100
20.000	100	95
25.000	37	91
30.000	31	83
35.000	26	72
40.000	26	67

Fig. 42: Confronto di percentuale di contatto tra cono ISO ed HSK

Fig. 42: Comparison by percentage of contact between the ISO and HSK cones

Parlando di lavorazioni ad Alta Velocità si parla di lavorazioni nelle quali il regime di rotazione dell'utensile può variare minimo dai 15.000 giri fino ad arrivare ai 40.000 giri.

È evidente, in queste condizioni operative, l'importanza dell'equilibratura del gruppo utensile-portautensile per ottenere un'ottima qualità della lavorazione finale.

Occorre notare che per non danneggiare organi della macchina delicati, qual è ad esempio l'elettromandrino, è importante avere utensili equilibrati già a partire dagli 8.000 giri.

Per capire meglio il fenomeno parliamo con l'analizzare il concetto di squilibratura che è la condizione che si verifica quando l'asse della massa rotante non coincide con l'asse di rotazione della massa stessa. Con riferimento alla figura si possono individuare tre tipi di squilibratura:

- statica (o di singolo piano), quando l'asse della massa non coincide con l'asse di rotazione, ma è ad esso parallelo.

- in coppia, quando l'asse della massa non coincide con l'asse di rotazione, ma lo interseca in corrispondenza del centro di gravità del rotore

- dinamica (o a due piani), quando l'asse della massa non coincide con l'asse di rotazione, non è ad esso parallelo e lo interseca al di fuori del centro di gravità del rotore.

La squilibratura dinamica è una combinazione di squilibratura statica e in coppia ed è presente praticamente in tutte le masse rotanti coinvolte nelle lavorazioni meccaniche.

Lo squilibrio residuo di una massa rotante "U" viene calcolato con la formula: $U = m r$ dove m è la massa (espressa in grammi) e r è il raggio del pezzo da equilibrare (espresso in mm).

Ogni situazione di squilibratura produce una forza centrifuga F, determinata come: $F = U \omega^2$ dove ω è la velocità angolare (espressa in radianti per secondo).

La formula di $\omega = (2 \pi n)/60$

Combinando le due formule, la forza centrifuga diventa:

$$F = \frac{m r (2 \pi n)^2}{3600}$$

When working at high speed, the work requires rotation speeds for the tool that may vary from a minimum of 15,000 rpm to speeds of up to 40,000 rpm.

It is obvious that, under these conditions, the balance of the tool - tool-holding unit is important in order to obtain an optimum quality in the final working.

It is necessary to note that in order not to damage the delicate parts of the machine, such as the electrospindle for example, it is best to have balanced tools right from the start at 8,000 rpm.

To understand this phenomenon better, let us analyse the concept of unbalance, which is the condition that occurs when the axis of a rotating mass does not coincide with the axis of rotation for the mass itself. If we refer to the figure, we can see three types of unbalance:

- static (or in a single plane): when the axis of the mass does not coincide with axis of rotation, but it is parallel to it

- coupled: when the axis of the mass does not coincide with axis of rotation, but intersects it through the centre of gravity of the rotor.

- dynamic (or in two planes): when the axis of the mass does not coincide with the axis of rotation, it is not parallel to it and intersects it away from the centre of gravity of the rotor.

Dynamic unbalance is a combination of static unbalance and coupled unbalance, and is present in practically all rotating masses involved in mechanical working.

Residual unbalance of a rotating mass, "U", is calculated with the formula: $U = m r$, where "m" is the mass (expressed in grams) and "r" is the radius of the piece to be balanced (expressed in mm).

Every situation of unbalance produces a centrifugal force "F", determined by $F = U \omega^2$ where " ω " is the angular speed (expressed in radians per second).

The formula is $\omega = (2 \pi n)/60$

So, combining the two formulas, the centrifugal force becomes:

$$F = \frac{m r (2 \pi n)^2}{3600}$$

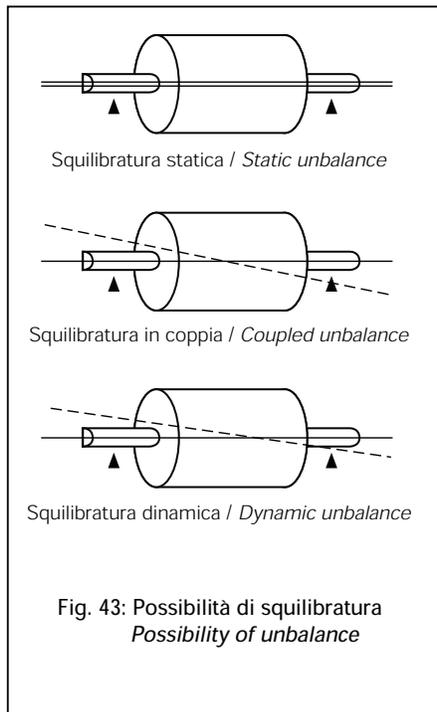


Fig. 43: Possibilità di squilibratura
Possibility of unbalance

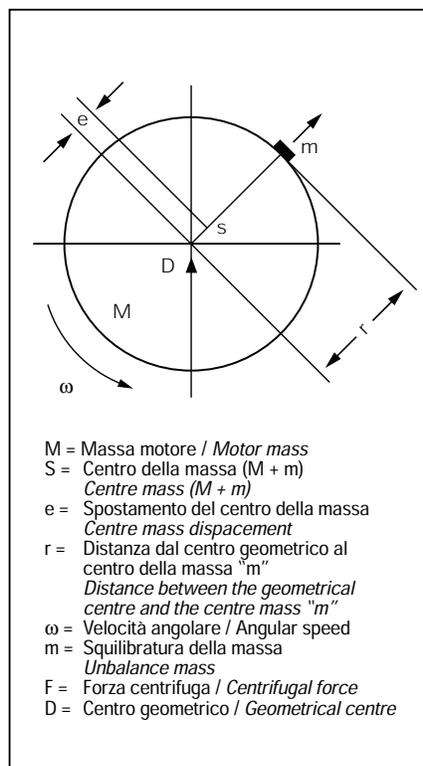


Fig. 44: Schema di rotore squilibrato
Scheme of an unbalanced rotor

Si può vedere che aumentando la velocità di rotazione n , la forza centrifuga F dovuta alla squilibratura non aumenta linearmente, ma in proporzione quadratica.

Se fino ad una velocità di 8.000 giri/min è sufficiente un buon mandrino equilibrato dal costruttore in classe G 2.5, oltre gli 8.000 giri/min l'equilibratura dinamica diventa importantissima, infatti un'equilibratura inadeguata può provocare:

- danni nel pezzo in lavorazione, per effetto delle vibrazioni dell'utensile. Ne derivano una scarsa finitura superficiale e precisione dimensionale.
- danneggiamento dei cuscinetti del mandrino che avranno un'usura molto precoce con conseguenti frequenti arresti macchina.
- riduzione della vita del tagliente fino al 50%

Nelle lavorazioni ad Alta Velocità l'errore di concentricità dell'utensile è particolarmente critico, rilevato in prossimità del tagliente questo non dovrebbe superare i 10 μm , infatti empiricamente si verifica che per ogni 10 μm di eccentricità si riduce la durata del tagliente del 50%, oltre naturalmente ai problemi indotti sulla qualità di finitura del pezzo.

Le classi di equilibratura sono standardizzate ed il metodo di calcolo è riportato nella norma ISO 1940 della quale di seguito riportiamo un breve esempio. La classe di equilibratura è indicata con la lettera "G" seguita da un numero, ad esempio 2.5 che indica il valore di squilibrio residuo ad una velocità stabilita.

Dalla norma ISO 1940, in funzione del tipo di lavorazione e dei parametri di taglio si individua la relativa classe di equilibratura.

Per lavorazioni meccaniche ad alte velocità la classe di equilibratura è G 2.5.

G è il prodotto dello sbilanciamento specifico "e" per la velocità di rotazione angolare w , quindi:

$$G = e \times w \text{ (espresso in mm/sec)}$$

$$\text{dato che: } e = U/M \quad G = \frac{U \omega}{M}$$

$$\text{e dato che: } \omega = \frac{2 \pi n}{60} \quad G = \frac{U (2 \pi n)}{M 60}$$

$$\text{risolvendo per U e svolgendo i calcoli: } U = \frac{9,5 M G}{N}$$

U è lo squilibrio residuo (espresso in gmm)

Proponiamo un calcolo dello squilibrio residuo di un portautensili di 3 kg che lavora a 25.000 giri/min

considerando due diverse classi di equilibratura G 2.5 e G 1:

$$U = \frac{9,5 \times 3000 \text{ gr} \times 2,5 \text{ mm/sec}}{25000} = 2,85 \text{ gmm}$$

$$U = \frac{9,5 \times 3000 \text{ gr} \times 1 \text{ mm/sec}}{25000} = 1,14 \text{ gmm}$$

You can see that increasing the rotation speed "n", the centrifugal force "F" due to the unbalance does not increase linearly, but in quadratic proportion.

If, at a speed of 8,000 rpm, it is sufficient to have a good balanced electrospindle from the manufacturer in class G 2.5, over 8,000 rpm the dynamic balance becomes very important indeed. In fact, an inadequate balance can cause:

- damage to the piece being worked, due to the effect of the tool vibrating. From this arises poor surface finish and dimensional precision;
- damage to the electrospindle bearings, which would suffer greater wear with frequent machine stoppages;
- reduction in the life of the cutting edge by up to 50%. In high-speed working, the concentricity of the tool is particularly critical. It is measured near the cutting edge, and should not exceed 10 μm . In fact, empirically it has been shown that for each 10 μm of eccentricity, the life-span of the cutting edge is reduced by 50%, as well as causing problems with the quality of finish of the piece, of course.

The classes of balancing are standardised, and the calculation method is shown in standard ISO 1940, from which we show a brief example. The balance class is indicated with the letter "G", followed by a number, for example 2.5, which shows the value of residual balance at an established speed.

From the ISO standard 1940, depending on the type of working and on the cutting parameters, you identify the relevant balance class.

For high-speed mechanical working, the balance class is G 2.5.

G is the product of specific unbalance "e" for the angular rotation speed w , therefore:

$$G = e \times w \text{ (expressed in mm/sec)}$$

$$\text{given that: } e = U/M \quad G = \frac{U \omega}{M}$$

$$\text{and given: } \omega = \frac{2 \pi n}{60} \quad G = \frac{U (2 \pi n)}{M 60}$$

$$\text{resolving for U and calculating: } U = \frac{9,5 M G}{N}$$

U is the residual unbalance (expressed in gmm)

Let us now take a calculation of the residual unbalance of a tool-holder of 3 kg that works at 25,000 rpm.

considering two different classes of balancing, G 2.5 and G 1:

$$U = \frac{9,5 \times 3000 \text{ gm} \times 2,5 \text{ mm/sec}}{25000} = 2,85 \text{ gmm}$$

$$U = \frac{9,5 \times 3000 \text{ gm} \times 1 \text{ mm/sec}}{25000} = 1,14 \text{ gmm}$$

Le possibili cause che possono generare lo squilibrio del gruppo portautensile utensile possono essere ricondotte a:

a) cause geometrico costruttive eliminabili già in fase di costruzione del portautensili con un'adeguata bilanciatura dello stesso come:

- la posizione asimmetrica delle scanalature usate per il cambio automatico (portautensili DIN o CAT)
- le viti di bloccaggio nei portautensili Weldon
- la scanalatura a V non rettificata della flangia

b) cause più operative o costruttive ma difficili da controllare e da eliminare, come:

- la non perfetta posizione della pinza e della sua ghiera di bloccaggio nella sua sede
- non perfetto centraggio dell'utensile con il portautensile
- il codolo dell'utensile (Weldon o Whistle Notch)
- la lunghezza e profondità diverse della scanalatura dell'elica
- le forme asimmetriche per particolari esigenze di lavorazione (tipo barre di alesatura).

Per eliminare il più possibile questi ultimi problemi, soprattutto nelle operazioni di finitura, occorre utilizzare portautensili simmetrici e di precisione. Tra tutti quelli che garantiscono il miglior risultato sono quelli con calettamento dell'utensile a caldo. Negli altri casi per ottenere la massima compensazione dello squilibrio si possono utilizzare portautensili bilanciabili. Questi portautensili hanno la possibilità di poter eseguire al loro interno uno spostamento di masse in modo tale da riportare entro il valore desiderato lo squilibrio del gruppo utensile-portautensile. I fattori discriminanti nella scelta di un portautensile bilanciabile sono:

- alta qualità del materiale e massima precisione di costruzione
- un basso valore di sbilanciamento residuo dato dall'azienda costruttrice
- l'esistenza di due piani di equilibratura (necessari per portautensili con $L > 100$ mm o $> 2D$, oppure con velocità di rotazione oltre 15.000-20.000 giri/min)
- la precisione della scala graduata delle ghiera e la loro corrispondenza alla realtà
- un sistema di bloccaggio delle ghiera che assicuri la massima stabilità
- un sistema che impedisca alle ghiera di deformarsi per effetto della forza centrifuga.

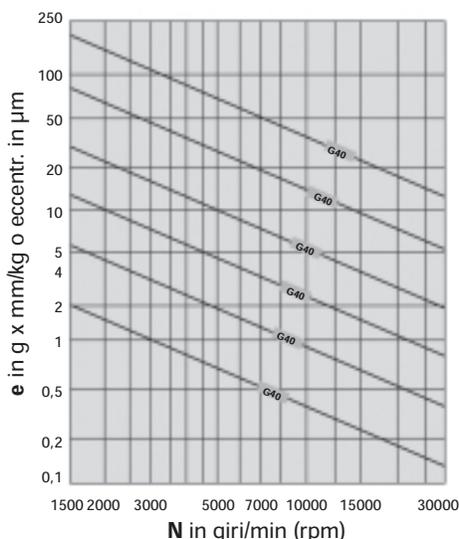


Fig. 45: Classi di equilibratura
Classes of balancing

The possible causes of unbalance in the tool-holder - tool unit can be traced to the following:

a) constructive geometrical factors that can be eliminated in the construction phase of the tool-holder by adequately balancing it, thus:

- the asymmetric position of the grooves used for the automatic change (DIN or CAT tool-holders),
- the locking screws in the Weldon tool-holders,
- the non-machined V-shaped grooves of the flange,

b) causes which are more operational or constructional, but difficult to check and to eliminate, such as:

- the imperfect positioning of the gripper and its lock nut in its position,

- the tool is not perfectly centred with the tool-holder,
- the chuck for the tool (Weldon or Whistle Notch),
- the length and depth different from the groove of the spiral
- the asymmetric shapes for special working requirements (boring bar type).

To eliminate these latter problems as much as possible, above all in the finishing operations, it is necessary to use symmetrical and precision tool-holders. Among all those which ensure the best results are those with hot keying of the tool. In other cases, to obtain the maximum compensation for unbalance, you can use tool-holders that can be balanced up. These tool-holders have the option of being able to move weight inside them so as to restore the value of the unbalance of the tool - tool-holder unit to that required.

The discriminating factors in choosing a tool-holder that can be balanced are:

- high quality of material and precision of construction,
- a low value for the residual unbalance given by the manufacturers,
- the existence of two balancing planes (necessary for tool-holders with $L > 100$ mm or $> 2D$, or with rotation velocity over 15,000-20,000 rpm),
- the precision of the graduated scale of the ferrules and their correspondence to reality
- a system of locking of the ferrules that ensure maximum stability,
- a system that prevents the ferrules from becoming deformed due to the centrifugal forces.

Può essere utile a questo punto dare un breve cenno sulle macchine equilibratrici che si possono trovare sul mercato.

Possiamo suddividerle fondamentalmente in due categorie:

- 1) macchine a piano singolo, che permettono solo la misurazione e la correzione della squilibratura statica, lasciando inalterato o creando una squilibratura in coppia
- 2) macchine a due piani, che permettono la misurazione e la correzione della squilibratura dinamica, in corrispondenza a due piani pre-selezionati.

Il primo tipo è da utilizzarsi per equilibrare portautensili con velocità di lavorazione inferiore a 15.000 giri/min, e con utensili di lunghezza inferiore a due volte il diametro in corrispondenza della linea di fede e che siano stati pre-bilanciati dal costruttore.

Il secondo tipo invece si rende indispensabile per equilibrare portautensili con velocità di rotazione superiori a 15.000-20.000 giri/min, con lunghezza superiore a due volte il diametro in corrispondenza della linea di fede.

Nel caso di attacco utensile HSK vi sono macchine equilibratrici appositamente studiate per questa tipologia di attacco.

Il corpo dell'utensile

Il corpo utensile svolge fondamentalmente le funzioni di:

- fissaggio e supporto del tagliente
- garantire l'adeguata resistenza e rigidità durante l'azione di taglio
- permettere un'ottima evacuazione del truciolo
- garantire un'ottima precisione dimensionale e geometrica
- smorzare le vibrazioni che si generano durante la lavorazione

Se nelle lavorazioni tradizionali alcuni particolari costruttivi del corpo utensile possono passare in secondo ordine, nella nuova fresatura HSC ognuno dei punti sopra elencati assume un ruolo molto importante.

Prendiamo ad esempio il fissaggio del tagliente: la vite nell'applicazione standard è dimensionata essenzialmente per resistere a carichi assiali generati dalla forza di taglio, nelle applicazioni HSC in taluni casi la forza centrifuga che si genera è molto superiore a quella dovuta all'azione di taglio per cui è molto importante che sia la vite che la sede dell'inserto siano studiati per garantire la massima stabilità e resistenza anche a questo tipo di forze.

It may be useful at this point to give a brief overview of the balancing machines that can be found on the market. We can basically divide them into two categories:

- 1) machines with a single plane, that only allow the measuring and correcting of static unbalance, leaving unaltered or creating a coupled unbalance*
- 2) machines with two planes, that allow the measuring and correcting of dynamic unbalance, corresponding to two pre-selected planes.*

The first type is to be used to balance tool-holders with a working speed of less than 15,000 rpm, and with tool of a length less than twice the diameter corresponding to the index line, and that have been pre-balanced by the manufacturer.

The second type is valuable for balancing tool-holders with a rotation speed of more than 15,000-20,000 rpm, with a length more than twice the diameter corresponding to the index line.

In the case of HSK tool connectors, there are balancing machines especially designed for this type of connector.

The body of the tool

The tool body carries out the following functions:

- fixing and supporting the cutting edge,*
- ensuring adequate strength and rigidity during the cutting action,*
- allowing an optimum removal of the chip,*
- ensuring optimum dimensional and geometrical precision*
- absorbing the vibrations that are created during working.*

If, in traditional work, some constructional parts of the tool body may become of secondary importance, in the new HSC milling process, each of the points listed above assumes a much more important role.

Let us take as an example the fixing of the cutting edge. The screw in the standard application is designed essentially to withstand axial loads generated by the cutting force. In the HSC applications, in some cases the centrifugal force that is generated is much higher than that due to the cutting action. So therefore it is very important that both the screw and the seating of the insert are designed to ensure the maximum stability and resistance even to these types of forces.

F_c: forza centrifuga sul corpo utensile
 F_i: forza centrifuga sull'inserto
 F_t: forza di taglio tangenziale
 F_a: forza assiale determinata dalla profondità di taglio dp
 F_r: forza radiale determinata dalla larghezza di passata de

F_c: centrifugal force of the tool body
 F_i: centrifugal force of the insert
 F_t: tangential cutting force
 F_a: axial force determined by the cutting depth dp
 F_r: radial force determined by the width of the run de

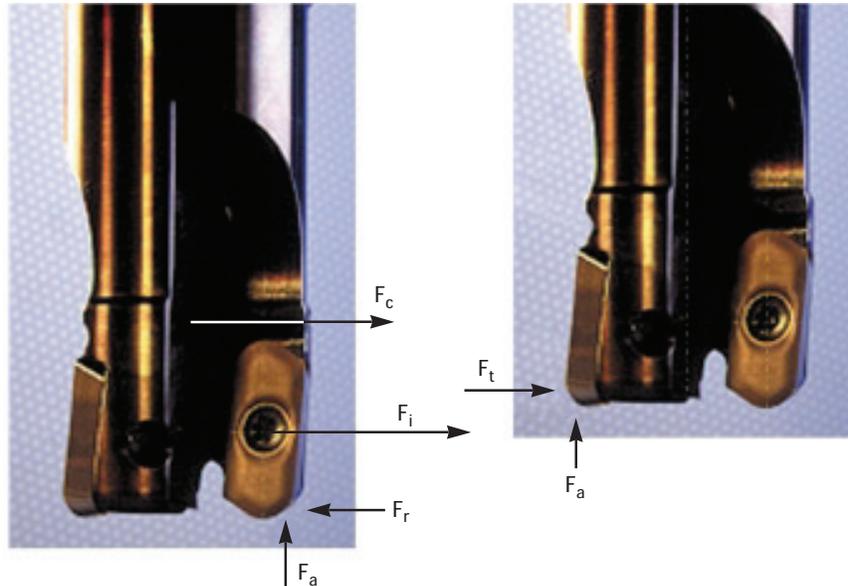


Fig. 46: Rappresentazione schematica delle forze durante il taglio
 Schematical representation of forces during cutting

Le forze centrifughe che agiscono sia sul corpo che sull'inserto aumentano in modo esponenziale all'aumentare della velocità di rotazione e come possiamo vedere dal seguente grafico, in funzione del diametro dell'utensile, raggiungono valori paragonabili o superiori a quelli delle forze di taglio.

The centrifugal forces that act both on the body and on the insert increase exponentially as the rotation speed increases, and, as you can see from the following graph, according to the diameter of the tool they reach values which are equal to or higher than that of the cutting force.

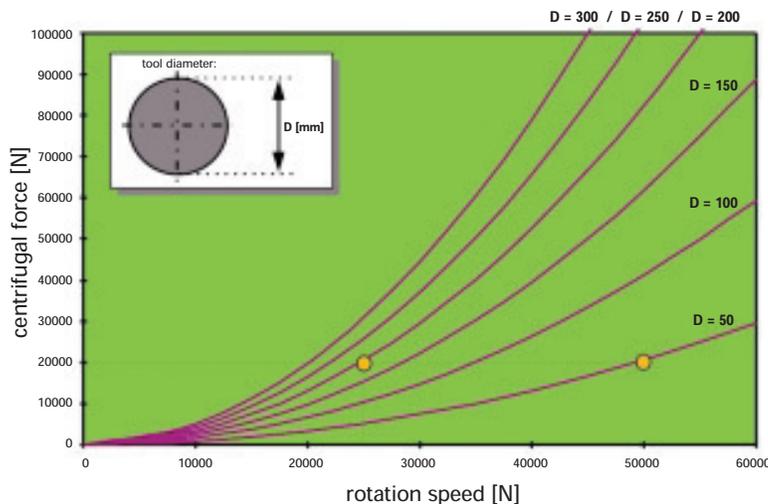


Fig. 47: Andamento della forza centrifuga al variare della velocità e del diametro

Centrifugal force trend when changing speed and diameter

La spalla del tagliente deve essere la più grossa possibile per garantire stabilità e rigidità ed allo stesso tempo deve lasciare il maggior spazio possibile per l'evacuazione del truciolo. Esigenze ancora più particolari si hanno negli utensili che eseguono la sgrossatura per penetrazione assiale.

The structure supporting the cutting edge must be as thick as possible to ensure stability and rigidity, and at the same time it must leave as much space as possible for the removal of the chip. There are even more special requirements for tools that carry out rough-machining operations by axial

Il gambo dell'utensile deve poi permettere di avvicinarsi al pezzo il più possibile garantendo la massima rigidità, ecco che nascono quindi gambi a rigidità variabile quando la lunghezza supera i 100 mm.

penetration. The shank of the tool must then allow it to get as close as possible to the piece, ensuring the maximum rigidity. This is why shafts of variable rigidity have been designed for when the length exceeds 100 mm.



Fig. 48: Esempio di portautensile con mandrino integrale
Photo of tool-holder with integral spindle

Nelle lavorazioni di finitura con utensili lunghi per ottenere i migliori risultati si utilizzano steli di utensili in materiale antivibrante. Questi materiali sono dei materiali ad alta densità con struttura cristallina particolarmente studiata per avere un effetto di smorzamento delle vibrazioni che si generano durante il taglio interrotto, proprio nelle operazioni di fresatura.

In the finishing work with long tools, to obtain the best results, tool rods are used made of anti-vibration material. These materials have a high density with crystalline structure, especially designed to have a dampening effect on the vibrations that are created during interrupted cutting, just in milling operations.

2.4 - Fattori che caratterizzano la lavorazione ad Alta Velocità

Come abbiamo già in parte visto nei precedenti paragrafi i fattori che influiscono sulla lavorazione del pezzo nella tecnologia HSM sono diversi e partono dalla programmazione della lavorazione (CAD-CAM) fino ad arrivare all'utensile.

Volendo brevemente focalizzare i concetti principali che occorre tenere presente nelle varie fasi che intercorrono nella realizzazione di un pezzo potremo individuare le seguenti fasi:

- Programmazione
- Preparazione ed ottimizzazione macchina/pezzo
- Lavorazione

Programmazione

La fase di programmazione della lavorazione si svolge fondamentalmente in ufficio con l'impiego di moderni strumenti informatici di CAD/CAM, grazie ai quali, partendo dal modello matematico tridimensionale del pezzo si realizzano i programmi di lavorazione da eseguire poi in macchina. Questi strumenti, anche se oramai esistono sul mercato da anni non è detto che siano sempre i più adatti per l'esecuzione di lavorazioni ad Alta Velocità.

Infatti l'ottimizzazione di questo processo richiede l'utilizzo di strategie e tecniche che permettano di ridurre i tempi di lavorazione, ottimizzare lo sfruttamento degli utensili ed ottenere i migliori risultati in qualità della lavorazione passando attraverso le fasi di sgrossatura, semifinitura e finitura.

Vediamo quindi quali debbano essere le principali caratteristiche di un CAM per lavorazioni ad Alta Velocità ed in particolare per le lavorazioni a cinque assi.

2.4 - Factors that characterize high speed working

As we have already partly seen in the previous paragraphs, the factors that influence working on a piece with HSM technology are varied and start from the programming of the work (CAD-CAM) and finish with the tool. Focussing briefly our attention on the principal concepts that need to be born in mind in the various phases that are gone through in creating a piece, we can identify the following phases:

- Programming
- Preparation and optimisation of machine and piece
- Working process

Programming

The phase of programming the work basically takes place in the office with the use of modern IT equipment, CAD/CAM, thanks to which, starting from the three-dimensional mathematical model, working programs are produced which are then to be carried out by the machine. These instruments, even if they have been on the market some years, are not necessarily the most suitable for executing high-speed work. In fact, the optimisation of this process required the use of strategies and techniques that allow the working time to be reduced, to optimise the use of the tools and to obtain the best quality results for the work, going through the phases of rough rough-machining, semi-finishing and finishing.

Let us look therefore at what the main characteristics of a CAM for high-speed working must be, and especially for working with five axes.

- Garantire una costanza del sovrametallo nelle lavorazioni di finitura del pezzo. Sovrametallo non costante implica variazione degli sforzi di taglio sull'utensile e quindi variazione di flessione utensile e possibilità di innesco di microvibrazioni, fattori questi che vanno ad influire direttamente sia sulla precisione che sulla finitura del pezzo finale.

- Strategie di lavorazione in concordanza: è noto che la condizione ottimale di lavoro dell'utensile è quella cosiddetta in concordanza, cioè la condizione in cui la combinazione tra avanzamento e senso di rotazione dell'utensile formano il truciolo partendo dalla sezione maggiore per finire a zero.

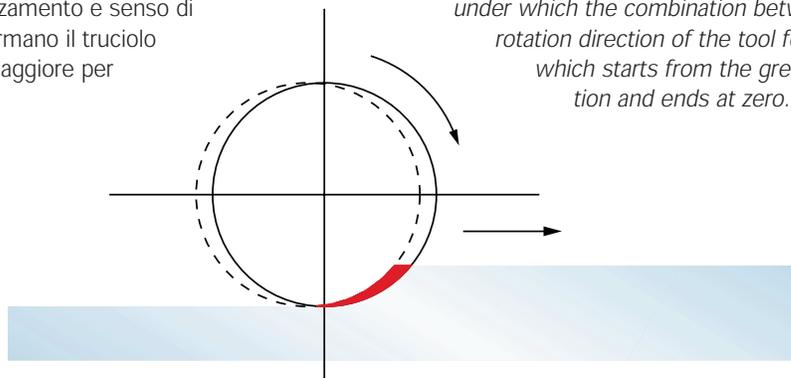


Fig. 49: Schema di fresatura in concordanza
Scheme of milling "in harmony"

- Ensure constant machining allowances in the finishing work on the piece.

- Machining allowances that are not constant involve variation in cutting forces on the tool, and so variations in tool flexion and the possibility of microvibrations starting. These are factors that directly affect the precision and the finish of the final piece.

- Strategies for working in harmony: We know that the optimum working conditions for a tool are what we may call "in harmony". That is to say the conditions under which the combination between feed and rotation direction of the tool form a chip which starts from the greatest cross-section and ends at zero.

- Strategie di lavorazione a cresta costante: risultano molto importanti quando si devono lavorare delle superfici che presentano variazioni di pendenza e si debba ottenere una costanza nella qualità della finitura superficiale ottimizzando il tempo di esecuzione. L'altezza della cresta è legata infatti al diametro della fresa ed allo step di passata. È chiaro che, a parità di altezza di cresta, lo step di passata può variare molto da quando si lavora una superficie piana a quando si lavora una parete con una certa pendenza. L'espressione della cresta per una superficie comunque inclinata è data da:

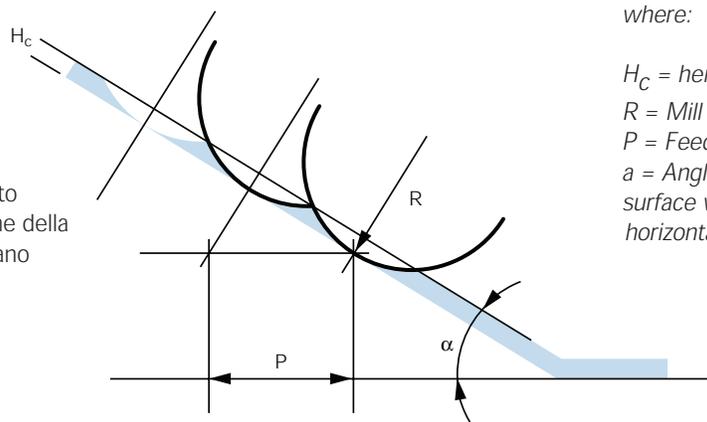
$$H_c = R \cdot [R^2 - (P^2 \times \cos^2 \alpha) / 4]^{1/2}$$

- Strategies for working with constant peaks: These are very important when we have to work on surfaces that have variations in slope, and we have to obtain constant quality of the surface finish, optimising the execution time. The height of the peak is in fact linked to the diameter of the mill and the step of the pass-run. It is obvious that for the same height of peak, the step of the pass-run can vary a lot from when we are working on a flat surface to when we work on a piece with a certain slope. The formula for the peak of a surface however it slopes is as follows:

$$H_c = R \cdot [R^2 - (P^2 \times \cos^2 \alpha) / 4]^{1/2}$$

dove:

H_c = Altezza cresta
R = Raggio fresa
P = Step di avanzamento
α = Angolo d'inclinazione della superficie rispetto al piano orizzontale



where:

H_c = height of the peak
R = Mill radius
P = Feed pitch
α = Angle of inclination of the surface with respect to the horizontal

Fig. 50: Schema di lavorazione di piano inclinato a cresta costante
Machining of an inclined surface with constant peaks

- **Strategie di lavorazioni SWARF:** sono strategie con le quali si realizza la lavorazione di una parete piana con un utensile cilindrico lavorando di fianco.

- **Strategie di svuotature tasche con ingresso in rampa ed avanzamento elicoidale.**

- **Strategie smoothing:** sono strategie con le quali si cerca di evitare durante la lavorazione ad Alta Velocità brusche variazioni di direzione dell'utensile o discontinuità di percorso.

- **Lavorare direttamente sulle superfici del pezzo:** permette di raggiungere la massima precisione della lavorazione

- **Ripresa in automatico del materiale residuo:** funzione molto importante in quanto permette di risparmiare lunghi ed inutili passaggi a vuoto su superfici già lavorate. Questa funzione che è praticamente normale nelle lavorazioni a tre assi, non è però comune nei CAM a cinque assi.

- **Uniforme distribuzione dei punti lungo la traiettoria:** permette una movimentazione più uniforme degli assi macchina e quindi miglior finitura del pezzo

- **Utilizzo di NURBS nella generazione del percorso utensile**

- **Verifica dell'interferenza tra utensile-portautensile e pezzo:** permette di verificare la fattibilità della lavorazione prima di mettere in esecuzione il programma e quindi di evitare danneggiamenti a pezzi molto costosi e notevoli perdite di tempo.

- **Capacità di verificare facilmente la correttezza del modello matematico:** permette di evidenziare che tutte le superfici che costituiscono il modello siano perfettamente combacianti tra di loro e non vi siano né buchi né sovrapposizione di superfici. La presenza di questi difetti genera errori nella lavorazione del pezzo.

- **Capacità di verificare e gestire la costanza dei versori delle superfici:** questa funzione è particolarmente utile nelle lavorazioni a cinque assi dove la presenza indesiderata di inversione dei versori della superficie provoca movimenti scoordinati della testa con conseguente rallentamento della lavorazione e difettosità nella finitura superficiale.

Preparazione ed ottimizzazione macchina/pezzo

Questa fase prevede il posizionamento ed il corretto staffaggio del particolare in macchina, l'eventuale scelta di particolari set di parametri macchina per l'ottimizzazione delle lavorazioni, la predisposizione di tutti gli utensili ed accessori necessari e la messa a punto dei programmi. Nelle lavorazioni ad Alta Velocità, vista l'elevata dinamica delle lavorazioni, anche lo staffaggio del pezzo, se non fatto correttamente, può dar luogo ad inneschi di vibrazioni che portano poi ad una cattiva esecuzione della lavorazione. Analogamente, particolari di forme sostanzialmente diverse potrebbero necessitare di parametri macchina differenti per ridurre i tempi macchina o migliorare la qualità della lavorazione.

- **Strategies for SWARF working:** These are strategies with which work is carried out on a flat wall with a cylindrical tool working on the edge.

- **Strategies for emptying cavities with ramp entry and spiral feed.**

- **Strategic smoothing:** These are strategies with which, during high-speed working, we try to avoid sharp changes in the direction of the tool or discontinuity of travel.

- **Working directly on the surfaces of the piece:** This allows us to reach maximum precision of the work.

- **Automatic return to work on the residual material:** This is a very important function, since it saves long and wasteful non-working passes on surfaces that have already been worked. This function is virtually normal in three-axes working, but not common in five-axis CAMs.

- **Uniform distribution of the points along the path:** This allows a more uniform movement of the machine axes, and so a better finish of the piece.

- **Use of NURBS in generating the tool path.**

- **Check on the interference between tool - tool-holder and piece:** This allows you to check the feasibility of working before carrying out the program, and thus avoiding damage to very expensive pieces and making considerable savings in time

- **Capacity to easily check that the mathematical model is correct:** Allows you to ensure that all the surfaces that make up the model perfectly match each other, and there are no holes or overlaps of surfaces. These defects would generate errors in working the piece.

- **Capacity to check and control the unit vectors of the surfaces:** This function is particularly useful in five-axis work, where the unwanted presence of inversion of the unit vectors of the surface causes uncoordinated movements of the head, with subsequent slowing down of the work, and defects in the finish.

Preparation and optimisation of machine and piece

This phase involves positioning and correctly fixing the pieces in the machine, any choice of particular sets of machine parameters for the optimisation of the work, preparing all the tools and accessories necessary and setting up the programs. In high-speed machining, given the high dynamics of working, even fixing the piece, if not done correctly, can lead to vibrations starting, which would then cause the work to be poorly carried out. Similarly, pieces with shapes that are substantially different could require different machine parameters to reduce the machine times or improve the quality of the work.

Altro aspetto molto importante nella preparazione della macchina è, come abbiamo già visto, la preparazione del gruppo utensile-portautensile per il quale occorre:

- Assicurarsi che siano correttamente definiti i parametri utensile (lunghezza e raggio)
- Assicurarsi che l'utensile sia integro
- Assicurarsi che la geometria sia quella desiderata
- Assicurarsi che l'utensile sia equilibrato secondo le specifiche richieste

Nelle moderne macchine per Alta Velocità, proprio per l'importanza che ha questo ultimo aspetto sia per l'integrità della macchina, sia per la qualità della lavorazione, spesso viene integrato nella testa operatrice un sensore che rileva dinamicamente lo squilibrio dell'utensile sia in fase di avvio di lavorazione, come ulteriore verifica della corretta bilanciatura, sia in fase di lavorazione per accorgersi di eventuali rotture dell'utensile.

Lavorazione

Una volta iniziata la lavorazione del pezzo potrebbe sembrare che oramai tutto sia definito e quindi la macchina debba soltanto eseguire il programma prestabilito senza interruzione.

In realtà, in funzione anche del tipo di pezzo e di materiale da lavorare, si può ancora intervenire sul processo per effettuare un'ottimizzazione.

In particolare si può intervenire su:

- Lubrificazione: in funzione del tipo di operazione, di utensile e materiale si potrà scegliere se lavorare con lubrificante-refrigerante, a secco o con lubrificazione minima aria-olio. Generalmente, soprattutto nelle operazioni di finitura, si lavora sempre con getto d'aria sull'utensile per tenere pulita la zona di lavoro dai trucioli che si formano durante la lavorazione e che potrebbero interferire con il tagliente provocando difettosità nella finitura superficiale del pezzo.

- Parametri di lavorazione: per ottimizzare i tempi di esecuzione si possono scegliere parametri di lavorazione diversi a seconda della fase di lavorazione che stiamo eseguendo. Durante la fase di sgrossatura, infatti, non interessa un'eccessiva precisione mentre invece interessa asportare la maggior quantità di materiale alla massima velocità, per cui si può adottare un set di parametri macchina che favorisca questo aspetto a discapito della precisione. Durante la semifinitura si può invece adottare un set di parametri che lasci comunque la macchina lavorare velocemente, ma che al contempo garantisca una maggior precisione proprio per preparare una superficie con un sovrametallo il più costante possibile per garantire la migliore esecuzione della fase di finitura, dove sceglieremo dei parametri che garantiscano la massima precisione, proprio per garantire le tolleranze richieste. I moderni CNC prevedono già di poter richiamare da Part Program set di parametri macchina diversi.

Another very important aspect in preparing the machine is, as we have already seen, the preparation of the tool - tool-holder unit, for which it is necessary to do the following:

- Ensure that the tool parameters have been correctly defined (length and radius).*
- Ensure that the tool is intact.*
- Ensure that the geometry is that required,*
- Ensure that the tool is balanced, according to the specific requirements.*

In modern machines for high-speed working, this aspect is very important, both to prevent damage to the machine and for the quality of work. Therefore the operating head often incorporates a sensor that dynamically detects any unbalance of the tool, both in the work start-up phase, as the last check of the correct balance, and in the work phase, to detect any breakage in the tool.

Working

Once work has started on the piece, it could seem that everything has already been defined, and so the machine only has to carry out the program established without interruption.

But in fact, also depending on the type of piece and material to be worked, you can also intervene during the process to carry out optimisation.

In particular, you could take action on the following factors:

- Lubrication: *According to the type of operation, of tool and material, you can choose whether to work with lubricant-coolant, dry, or with minimal air-oil lubrication. Generally, above all in finishing operations, we always work with a jet of air on the tool, to keep the work zone free of chips, that form during working, and that could interfere with cutting edge, causing defects in the surface finish of the piece.*

- Working parameters: *To optimise the times of execution, you can choose different work parameters according to the phase of work that is being carried out. During the rough rough-machining stage, for example, great precision is not required, while we want to remove a higher quantity of material at maximum speed. So you can adopt a set of machine parameters that favours this aspect rather than precision. Whereas during semi-finishing, you can adopt a set of parameters that lets the machine work fast, but at the same time ensures higher precision in order to prepare a surface with a machining allowance which is as constant as possible. This ensures the best execution of the finishing phase, where we will choose the parameters that ensure maximum precision, precisely to ensure the work is within the required tolerances. Modern CNC's have already the potential of being able to recall different sets of machine parameters from the part program.*

- **Equilibratura utensile:** come abbiamo già detto precedentemente è possibile avere sulle teste operatrici dei dispositivi che verifichino il run time e la corretta equilibratura e integrità dell'utensile in modo tale da garantire la corretta esecuzione del particolare.

- **Presetting:** il presetting a bordo macchina è molto importante per poter aggiornare il run time, i correttori utensili durante la lavorazione di un pezzo, qualora si utilizzi lo stesso utensile per lavorazioni diverse. L'utensile infatti durante la lavorazione si usura e quindi varia i suoi valori di lunghezza e raggio. Per ogni tipo di utensile, in funzione del materiale che lavora e dei parametri di lavorazione utilizzati, viene definita una durata, detta "vita", intesa come il tempo per il quale l'utensile può lavorare senza che i suoi parametri geometrici e di taglierina siano compromessi. È chiaro però che durante la vita i parametri dell'utensile cambiano ed utilizzando il presetting in process si può determinare prima dell'inizio di ogni lavorazione gli esatti valori di lunghezza e raggio in modo da garantire la massima precisione di lavorazione.

- **Situazioni particolari:** nella lavorazioni delle matrici si possono trovare talvolta situazioni che mettono in crisi la macchina e la lavorazione se non gestite manualmente dall'operatore o da particolari algoritmi. Ci riferiamo in particolare alla lavorazione di angoli di 90° o inferiori in cui l'utensile si trova di colpo dall'essere impegnato per metà della sua larghezza ad essere impegnato per tre quarti o più. In questo caso vi è un maggior numero di denti in presa e si richiede di colpo maggior potenza alla macchina con la velocità di avanzamento che, per un istante, tende a zero per cambiare direzione.

- **Tool balancing:** As we have already said, it is possible to have devices on the operating heads that check the run time, that check the correct balance and that the tool is intact, so as to be able to ensure the correct execution of work on the piece.

- **Presetting:** The presetting on board the machine is very important to be able to update the run time, the tool correctors during the working of a piece, whenever the same tool is used for different work. In fact, during work, the tool wears, and so its length and radius values vary. For each type of tool, according to the material that is being worked and the work parameters used, a duration time is defined, the "lifespan", which is the time for which the tool can work without its geometrical and cutting parameters being compromised. It is clear, however, that during its life, the parameters of the tool, on changing and using the presetting in process, you can determine, before the start of each job, the exact values for length and radius, so as to ensure the maximum working precision.

- **Special situations:** In working matrixes, you can sometimes come across situations that are beyond the machine if they are not controlled manually by the operator, or by particular control algorithms. We refer especially to working with angles of 90° or less, where the tool suddenly changes from being used for half its length to be used for three-quarters or more, to having a greater number of teeth in the chuck, and to suddenly requiring higher power for the machine, with a feed speed that for a moment goes to zero to change direction.

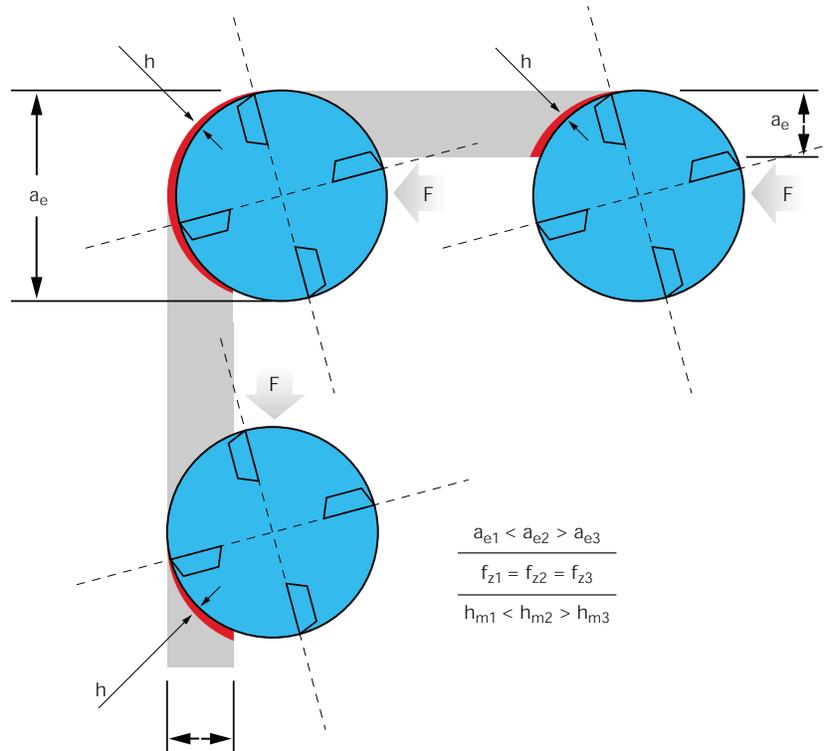


Fig. 51: Aumento dell'impegno dell'utensile in lavorazioni ad angolo
Increase of the involvement when working with angles

Questa situazione innesca generalmente vibrazioni sull'utensile che possono essere eliminate riducendo la velocità di avanzamento in prossimità dell'angolo per poi ripristinarla nella zona dritta. Quando la tasca è profonda la situazione è resa ancora più critica dall'aumentare della lunghezza utensile. In questo caso per limitare al massimo le vibrazioni si devono utilizzare portautensili il più rigidi possibile e in materiale antivibrante.

Situazioni analoghe si possono avere anche nella sgrossatura di fusioni di alluminio dove l'utensile può ritrovarsi ad asportare grosse variazioni di spessore rispetto a quello programmato che possono mandare in sovrassorbimento il mandrino con conseguente arresto della macchina se non opportunamente gestite da algoritmi di Power Monitor.

- Gestione 4°-5° asse per posizionamento utensile:

nelle operazioni di finitura con macchine a cinque assi, qualora non si eseguano lavorazioni a cinque assi continui, ci può essere comunque la necessità di gestire l'orientamento della testa per ottenere le migliori condizioni di taglio e di penetrazione. L'orientamento della testa può essere previsto già da CAM oppure impostato direttamente sul pezzo dall'operatore con l'ausilio del volantino manuale. Una volta impostata la nuova posizione della testa, la funzione TCPM (RTCP) del controllo permetterà di continuare la lavorazione senza discontinuità ricalcolando il nuovo percorso utensile.

- CAM a bordo macchina: può capitare talvolta che l'operatore si accorga che alcune parti del percorso utensile devono essere ricalcolate, o perché gli utensili programmati non sono disponibili o perché si evidenziano delle situazioni di collisione non facilmente verificabili a priori o perché la tecnologia applicata non è quella ottimale per la lavorazione di quel particolare settore. La possibilità di avere a bordo del controllo numerico un CAM facilmente utilizzabile dall'operatore, che gli permetta di ricalcolare il percorso utensile in breve tempo, minimizza o annulla i tempi di fermo macchina.

This situation generally starts vibrations on the tool, that can be eliminated by reducing the feed speed near the corner, and then restoring it in the straight zone. When the cavity is deep, the situation becomes even more critical by the increased length of the tool.

In this case, to limit the vibrations as much as possible, you should use the most rigid tool-holders possible and they should be of an anti-vibration material.

Similar situations could arise in rough-machining aluminium alloy, where the tool could start to remove thicknesses widely differing from that programmed, which could cause the electrospindle to overload, causing the machine to stop, if not suitably controlled by Power Monitor algorithms.

- Control of 4°-5° axes for tool positioning: *in the finishing operations, with five-axis machines, whenever continuous five-axis work is not being executed, it could still be necessary to control the orientation of the head to obtain better cutting conditions and penetration. The orientation of the head can be already established by the CAM, or set directly on the piece by the operator with the help of the manual handwheel. Once the new position of the head has been set, the TCPM (RTCP) function will allow you to continue working without a break, by recalculating the new tool path.*

- CAM on board the machine: *It could sometimes happen that the operator realises that some parts of the tool path must be recalculated, either because the tools programmed are not available or because collision situations arise that are not easily predictable previously, or because the technology applied is not the best for the work on that particular sector. The possibility to have on board the numerical control a CAM which can be easily used by the operator that allows him to quickly recalculate the tool path minimises or cuts down the machine downtime to zero.*