



Viene fornita una definizione chiara e standard del runout dell'utensile e viene applicato un sistema di misurazione ottica appropriato per effettuare acquisizioni a bordo macchina

Il runout nella fresatura

Che cos'è il runout della fresa, come misurarlo e come prevederne gli effetti.

Questo articolo descrive una procedura ripetibile in grado di rilevare il runout dell'utensile a bordo di un centro di lavorazione di precisione, tenendo conto sia degli errori di rotondità dell'utensile sia degli errori di centraggio tra utensile e portautensile

■ Massimiliano Annoni

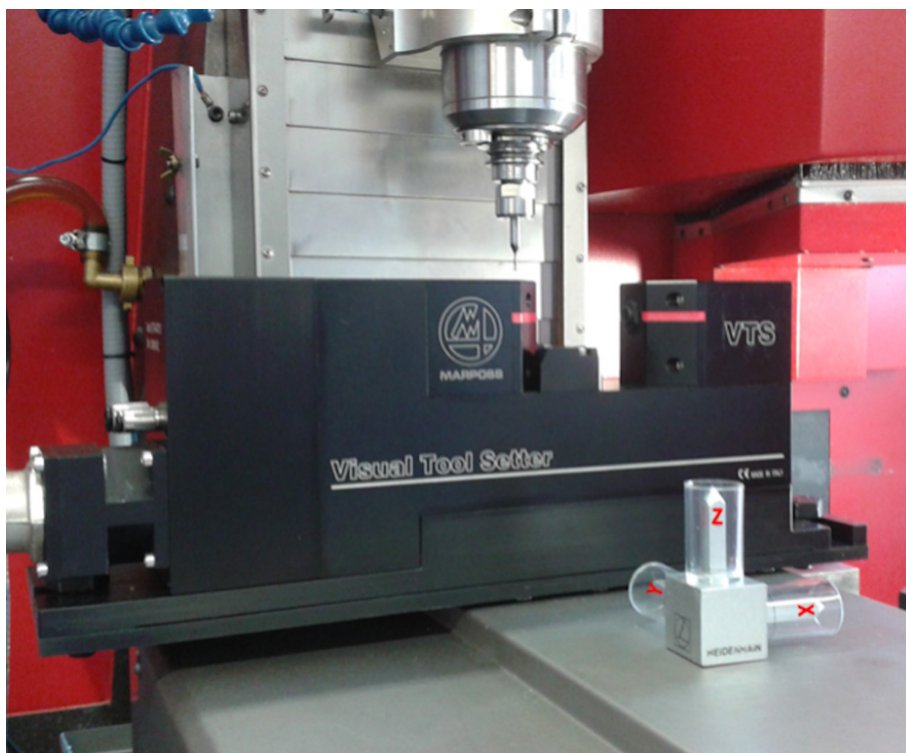


Figura 1. Marposs VTS© montato sul centro di lavorazione Kern EVO

solitamente si occupa della modellazione degli effetti del runout sulle forze di taglio senza considerare la sua misurazione. I recenti progressi nei sistemi di misurazione del runout degli utensili consentono di affrontare questo impegnativo compito di misurazione anche nel caso di utensili usati per microlavorazioni. Gli standard di tolleranza geometrica (ISO 1101:2017 (1) e ASME Y14.5-2018 (2)) definiscono l'errore di runout rispetto a un asse di riferimento che è matematicamente estratto dai punti misurati sulla superficie della caratteristica stessa. Il presente articolo, invece, prende la definizione di runout dallo standard ASME B89.3.4-2010 ("Axes of Rotation: Methods for Specifying and Testing") (3): il runout è "lo spostamento totale misurato da un indicatore che rileva una superficie in movimento o che si muove rispetto a una superficie fissa". Questa definizione, applicata al caso del runout degli utensili nella fresatura, lo definisce come composto dall'"errore di movimento del mandrino", dall'"errore di rotondità dell'utensile" (differenza tra i raggi delle taglienti) e dagli "errori di centraggio utensile-mandrino". L'errore di movimento del mandrino è definito come il movimento errato dell'asse rotante del mandrino intorno a un asse di riferimento; le fonti dell'errore di movimento sono le imprecisioni dei cuscinetti e/o la dinamica del sistema. Queste tre fonti di errore devono essere sommate vettorialmente e includono tutti i fattori che agiscono sul corretto fissaggio dell'utensile nel mandrino della macchina. La definizione di runout menzionata è equivalente al TIR ("total indicator reading") e FIM ("full indicator movement"), anche se questi ultimi termini dovrebbero essere evitati secondo gli standard. Il termine "runout radiale", invece, ha un significato accettato che include errori di centraggio e di non rotondità perpendicolari all'asse di riferimento del mandrino, ma non l'errore di movimento radiale del mandrino. In altre parole, il runout radiale non corrisponde al runout.



il runout è "lo spostamento totale misurato da un indicatore che rileva una superficie in movimento o che si muove rispetto a una superficie fissa"

Definizioni

Il runout dell'utensile gioca un ruolo fondamentale nelle microlavorazioni meccaniche e influisce sulla capacità del processo sia in termini di accuratezza dimensionale che superficiale. Inoltre, variazioni nello spessore di truciolo e negli angoli dei taglienti dovuti al runout riducono la durata dell'utensile e la fattibilità complessiva del processo a causa di rotture degli utensili e conseguenti danni spesso irreparabili al pezzo in lavorazione. Questo articolo descrive una procedura ripetibile in grado di rilevare il runout dell'utensile a bordo di un centro di lavorazione di precisione, tenendo conto sia degli errori di rotondità dell'utensile sia degli errori di centraggio tra utensile e portautensile. A tal fine, viene fornita una definizione chiara e standard del runout dell'utensile e viene applicato un sistema di misurazione ottica appropriato per effettuare acquisizioni a bordo macchina. Lo studio mostra in quale misura le forze di fresatura siano influenzate dal runout per cui è utile limitare questo fenomeno per preservare le frese e la qualità del componente lavorato.

Questo articolo ha l'obiettivo di presentare una procedura di misurazione in grado di valutare il valore del runout dell'utensile a bordo di un centro di microfresatura e di utilizzare queste informazioni per prevedere la capacità dell'utensile di resistere alle forze di taglio senza rotture. La letteratura scientifica non è coerente in termini di definizione del runout utensile e

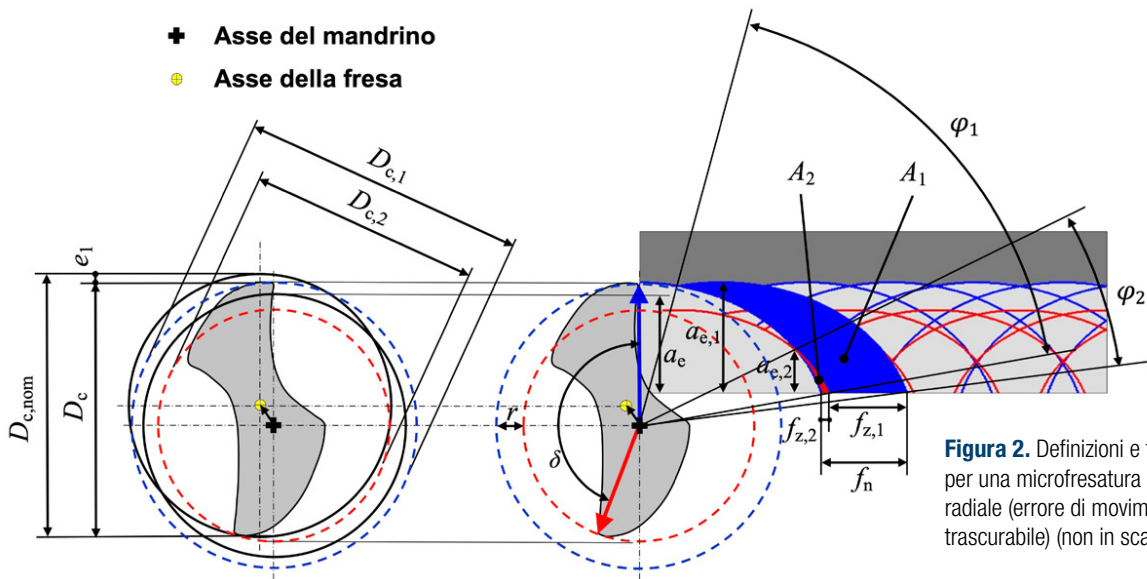


Figura 2. Definizioni e traiettorie dei taglienti per una microfresatura affetta da runout radiale (errore di movimento del mandrino trascurabile) (non in scala)

Sistemi di misura del runout

Il sistema di misurazione del runout dell'utensile utilizzato in questo articolo è installato a bordo di un centro di fresatura; ciò consente di acquisire l'utensile quando è influenzato da tutte e tre le fonti di errore indicate. Questa trattazione non ha lo scopo di separarle. Inoltre, si applica l'ipotesi di errore di movimento del mandrino trascurabile (cioè asse del mandrino perfettamente coincidente con l'asse di riferimento del mandrino), che è abbastanza forte in generale, ma ha senso quando vengono utilizzate macchine utensili adeguate (errore di movimento < 1 µm nel caso in questione). Questa ipotesi implica che il runout radiale r sia l'oggetto di studio e consente di derivare una procedura generale di misurazione del runout radiale dell'utensile che include le differenze nei raggi delle taglienti (chiamati errori di rotondità o di non rotondità dell'utensile), errori di centraggio utensile-portautensile e portautensile-mandrino nel loro insieme.

Inoltre, è stato modellato uno spessore del truciolo influenzato dal runout radiale per entrambi i taglienti di una tipica fresa per lavorazioni di precisione e sono state effettuate previsioni delle forze di taglio. Va sottolineato che solo errori di runout assialsimmetrici possono verificarsi sotto l'ipotesi di errore di movimento del mandrino trascurabile. Ciò implica che una fresa influenzata da un ta-



Esistono diverse metodologie per la caratterizzazione e la misurazione degli utensili che possono essere applicate per la valutazione del runout negli utensili di fresatura

le errore di runout radiale produca solchi di larghezza uguale in qualsiasi direzione si muova su un piano perpendicolare all'asse del mandrino, ma implica anche che tutte le direzioni perpendicolari all'asse del mandrino siano ugualmente sensibili a questo tipo di errore. Se il mandrino ruota lungo l'asse Z della macchina utensile, come nel caso presentato nell'articolo, un sistema di misurazione del runout radiale può essere posizionato sia lungo l'asse X sia lungo l'asse Y, o lungo qualsiasi altro asse situato nel piano X-Y.

Esistono diverse metodologie per la caratterizzazione e la misurazione degli utensili che possono essere applicate per la valutazione del runout negli utensili di fresatura:

- I sistemi laser sono ampiamente utilizzati, anche se mostrano alcuni problemi in caso di utensili molto piccoli (< 100 µm) a causa della dimensione del punto laser; inoltre, tendono a sottostimare la lunghezza dell'utensile in caso di angoli di punta dell'utensile piccoli. Inoltre, il loro errore dipende dalla precisione del movimento della macchina utensile.
- I sistemi misti tattili e ottici soffrono il sottosquadro e fenomeni di stick-slip.
- La misurazione per immagini, solitamente implementata come misura diascopica, è molto promettente anche se attualmente è piuttosto lenta se non si usano telecamere ad alta velocità.
- I sistemi capacitivi sono molto efficaci ma tendono a essere imprecisi su superfici tonde a causa del comportamento non lineare dello spostamento misurato.
- I microscopi ottici 3D basati sulla tecnica della variazione di fuoco sono potenti per le microparti 3D in generale, ma sono lenti e lavorano fuori dalla macchina.

Le tecniche presentate possono essere applicate a bordo o all'esterno della macchina utensile. Nel secondo caso, caratterizzano l'utensile su macchine stand-alone (tool presetter) quindi non tengono conto degli errori di centraggio utensile-portautensile che si hanno sulla macchina utensile, cosa non particolarmente rile-



È stato modellato uno spessore del truciolo influenzato dal runout radiale per entrambi i taglienti di una tipica fresa per lavorazioni di precisione e sono state effettuate previsioni delle forze di taglio



vante a patto che si usino tool holder di qualità, in grado di ridurre questa fonte di errore a pochissimi micron.

Altri studi in letteratura valutano il runout dell'utensile studiando la topografia della superficie lavorata o le forze di taglio; il principale svantaggio di queste soluzioni, che le rende inutili per lo scopo del presente articolo, è che non sono capaci di una valutazione a priori.

Considerando le caratteristiche delle tecniche di misurazione degli utensili menzionate e volendo sfruttare la possibilità di effettuare una valutazione a priori del runout radiale dei micro-utensili, abbiamo impiegato il Visual Tool Setter (VTS©) della Marposs installato nel centro di microlavorazione Kern Evo disponibile presso il MI_crolab del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano.

Modelli di previsione delle forze affette da runout. Questo articolo ha lo scopo di prevedere le forze di taglio considerando il runout radiale dell'utensile acquisita a bordo della macchina utensile prima di iniziare le operazioni di lavorazione. Il modello utilizzato nel presente articolo per la previsione delle forze di taglio in microfresatura è stato sviluppato da Lee et al. (4) e ampliato grazie a diverse tesi svolte presso MI_crolab e PoliMill negli ultimi anni (Scesciola, Pusterla, Casiraghi, Apari, Barna, Tenconi, Sala, Taranola, Mhanna).

Tra i modelli meccanicistici, questo modello è

adatto a interpretare la fisica della microlavorazione di fresatura considerando l'arrotondamento dei taglienti e l'angolo di spoglia frontale effettivo (partial effective rake angle), cioè l'angolo di spoglia frontale visto dal truciolo quando ad essere in presa è soltanto il raccordo sullo spigolo tagliente. Questa situazione è tipica della microfresatura, in cui lo spessore di truciolo è spesso molto piccolo (1-2 micron), e porta il truciolo a formarsi con spoglie effettive negative. Questo modello è stato originariamente implementato nell'ambiente LabVIEW© presso il MI_crolab nel 2010 per poi essere migliorato nel 2013 per considerare il runout mediante codice Matlab©. Nel 2021 si è deciso di riscrivere il modello in Python©, per sfruttare le librerie open source di questo linguaggio e permettere un'implementazione aperta verso nuove applicazioni in ambito Industria 4.0.

Un modo per includere il runout r nel modello di previsione delle forze di fresatura è modificare l'espressione analitica dello spessore del tru-

ciolo in funzione della posizione angolare della fresa. Questo articolo presenta un approccio diverso, in cui il nucleo del modello di previsione delle forze rimane lo stesso del caso a runout nullo, ma viene alimentato con diversi parametri di taglio equivalenti per rappresentare la situazione affetta da runout di ciascun tagliente (v. paragrafo "Previsione delle forze di fresatura affette da runout").

Una volta previste le forze influenzate dal runout radiale, questo approccio potrà essere sviluppato in futuro applicando alcuni criteri per valutare la capacità della fresa di resistere allo squilibrio prodotto dal runout e la possibilità di ottenere feature comunque in tolleranza. A quel punto, una volta misurato il runout in macchina con un presetter opportuno come quello usato in questo articolo, si potrà decidere se procedere con la lavorazione oppure se smontare e rimontare la fresa nel tool holder, come spesso si fa in microfresatura o se, ancora, cambiare fresa e/o tool holder. Questa opportunità

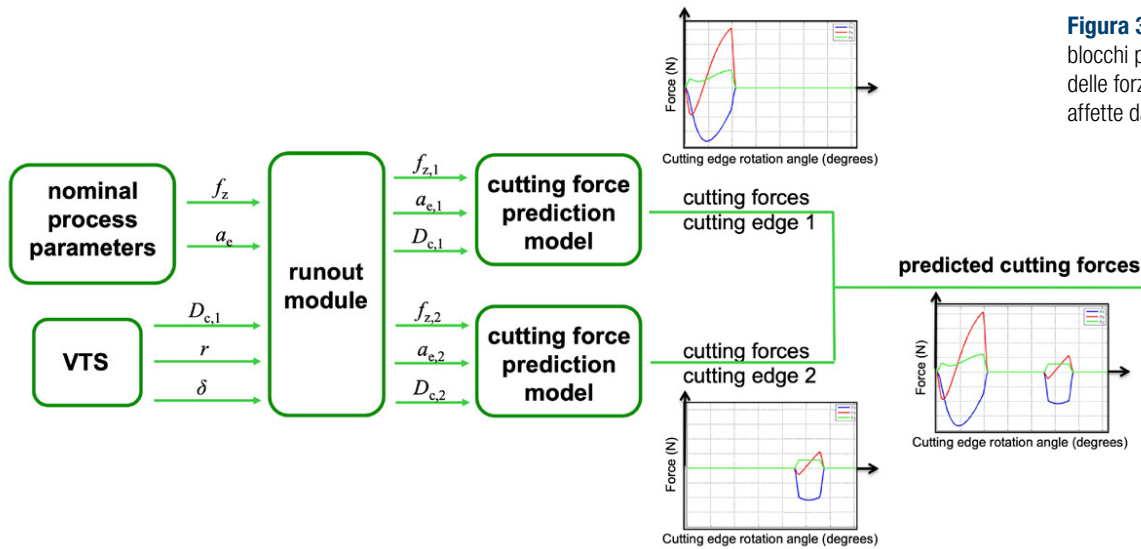


Figura 3. Diagramma a blocchi per la previsione delle forze di microfresatura affette da runout radiale

è cruciale per la microfresatura poiché guiderebbe gli utenti a prendere decisioni consapevoli sull'adeguatezza di un utensile. Attualmente, quasi nessuna informazione è disponibile a questo scopo.

Resta vero che il miglior modo per evitare i problemi del runout è non averlo per cui è buona norma dotarsi di una catena macchina-tool holder-utensile di qualità. L'approccio presentato in questo articolo ha quindi funzione di verifica.

Effetto del runout sulla geometria del taglio

Questo studio si basa sulla possibilità di effettuare misurazioni in macchina mediante il VTS© (Visual Tool Setter), un presetter utensili prodotto da Marposs S.p.A. e testato presso il MI_crolab del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. Il VTS può contare su una risoluzione di 0,1 μm e una ripetibilità di 0,2 μm (2σ), almeno nella versione presente in laboratorio, che ormai ha qualche anno. Il VTS è stato installato sul centro di lavorazione ultrapreciso a 5 assi Kern EVO (tolleranza nominale di posizionamento = $\pm 1 \mu\text{m}$, precisione sul pezzo = $\pm 2 \mu\text{m}$) (Figura 1).

Il VTS è dotato di una telecamera sincronizzata con la rotazione del mandrino per acquisire un set di immagini diascopiche dell'utensile a un passo angolare definito; un software dedicato analizza queste immagini e calcola il diametro dell'utensile D_c , il diametro dinamico massimo dell'utensile (o "circle diameter"

o, ancora, "diametro di volo") $D_{c,1}$, cioè il diametro del cerchio di involuppo di tutte le posizioni assunte dall'utensile durante una rotazione, e il runout radiale (o TIR) r (3), corrispondente alla differenza tra i raggi dinamici massimo e minimo dell'utensile (Figura 2). Il diametro dinamico minimo $D_{c,2}$ può essere ottenuto da $D_{c,1}$ e r (Figura 2). Come già descritto nel paragrafo "Sistemi di misura del runout", l'errore di movimento del mandrino è trascurabile, quindi il runout tiene conto degli errori di rotondità dell'utensile, degli errori di centraggio utensile-portautensile e portautensile-mandrino. Il VTS misura r alla velocità di rotazione operativa del mandrino; questo fatto gli consente di tenere conto dell'inerzia e del suo effetto su $D_{c,1}$, che tende ad aumentare e a produrre scanalature più ampie sul pezzo. Ovviamente, dato che la misura viene effettuata in aria, non si considera l'effetto dell'asportazione di materiale sulla deflessione della fresa.

In questo articolo vengono considerate frese a due taglienti. La Figura 2 rappresenta un caso generale in cui la fresa è affetta sia da un errore di centraggio, indicato dalla freccia tra l'asse del mandrino e quello della fresa, sia da un errore di rotondità che, nel caso di una fresa, corrisponde a un raggio diverso dei taglienti rispetto al centro della fresa: il tagliente 1, cioè il tagliente più impegnato che descrive il cerchio grande tratteggiato blu ($D_{c,1}$), è affetto dall'errore e_1 che rende il suo raggio più piccolo del valore nominale. L'errore di centraggio e l'er-



Il runout radiale dell'utensile rende le traiettorie dei taglienti diverse dalle cicloidi ideali identiche: questo fatto rende la spessore del truciolo prodotto da una tagliente diverso da quello dell'altro

rore di rotondità però si compensano nella Figura 2, tanto che il tagliente 1, pur avendo un raggio inferiore rispetto al centro fresa, è quello che asporta più materiale a causa dell'errore di centraggio, che opera nella direzione opposta. Questa rappresentazione è stata appositamente costruita per mostrare chiaramente l'effetto delle due componenti del runout rotondità della fresa e centraggio. Durante la rotazione della fresa attorno all'asse del mandrino, il tagliente meno impegnato, chiamato tagliente 2, descrive il cerchio piccolo tratteggiato rosso ($D_{c,2}$). I cerchi neri in linea continua rappresentano la geometria nominale della fresa nella sua posizione nominale e nella posizione fuori centro. I cerchi tratteggiati e quelli in linea continua sono generalmente diversi e le loro dimensioni e posizioni dipendono dagli errori di centraggio e di rotondità della fresa. Tali errori producono



Resta vero che il miglior modo per evitare i problemi del runout è non averlo per cui è buona norma dotarsi di una catena macchina-tool holder-utensile di qualità

modifiche nei parametri di taglio avanzamento al dente f_z e profondità di passata radiale a_e (v. parte destra della Figura 2); in particolare, ciascun tagliente si trova in una situazione diversa rispetto al nominale: non solo le profondità di taglio radiali e gli avanzamenti per dente sono diversi per i due taglienti, ma anche i loro angoli di spoglia frontale e dorsale, nonché il loro passo angolare δ . Gli angoli di spoglia frontale rischiano di diventare nulli o negativi a causa del runout, come avviene per il tagliente rosso.

Previsione delle forze di fresatura affette da runout

La previsione dell'effetto del runout radiale dell'utensile sulle forze di taglio è stata ottenuta utilizzando il modello di previsione delle forze di taglio già citato (4), secondo il diagramma mostrato nella Figura 3.

Il runout radiale dell'utensile rende le traiettorie dei taglienti diverse dalle cicloidali ideali identiche (Figura 2); questo fatto rende la spessore del truciolo prodotto da una tagliente diverso da quello dell'altro. Il modulo di calcolo del runout, implementato in Matlab© (Figura 3), riceve in input i parametri nominali del processo f_z e a_e e le acquisizioni effettuate dal VTS in macchina ($D_{c,1}$ e r ; δ sarà disponibile come sviluppo futuro di questa ricerca) e calcola il diametro effettivo di ciascun tagliente $D_{c,1}$ e $D_{c,2}$. Successivamente, genera le traiettorie delle taglienti affette da runout radiale, da cui calcola gli angoli di ingaggio effettivi φ_1 e φ_2 e le aree effettivamente rimosse (A_1 e A_2) tramite integrazione numerica; φ_1

e φ_2 vengono utilizzati per ottenere le profondità di passata radiali effettive $a_{e,1}$ e $a_{e,2}$ (Figura 2). L'avanzamento al dente effettivo dei due taglienti affetti da runout radiale, $f_{z,1}$ e $f_{z,2}$, derivano dalla formula qui riportata, dove l'area effettivamente rimossa da un tagliente i , ottenuta per integrazione numerica, è forzata ad essere uguale all'area rimossa nell'ipotesi di un normale comportamento sinusoidale dello spessore del truciolo lungo l'angolo di ingaggio effettivo del tagliente.

$$A_i = h_{m,i} \varphi_i \frac{D_{c,i}}{2} = f_{z,i} a_{e,i}$$

$h_{m,i}$ è lo spessore medio di truciolo relativo al tagliente i -esimo (dove i assume i valori 1 e 2), calcolabile secondo la formula seguente nel caso di normale andamento sinusoidale dello spessore di truciolo rispetto alla posizione angolare della fresa:

$$h_{m,i} = \frac{2f_{z,i}a_{e,i}}{\varphi_i D_{c,i}}$$

Il modello approssima la forma dell'area effettivamente rimossa dai taglienti con una forma standard, introducendo alcuni errori nel segnale di forza previsto. Questi errori possono essere considerati trascurabili quando r è piccolo.

Il modello di previsione della forza di taglio viene quindi eseguito separatamente per i due taglienti, tenendo conto dei diametri effettivi $D_{c,1}$ e $D_{c,2}$, degli avanzamenti al dente effettivi $f_{z,1}$ e $f_{z,2}$ e delle profondità di passata radiali effettive $a_{e,1}$ e $a_{e,2}$. In questo modo vengono previste le forze applicate ai taglienti della fresa che infine sono combinate in un grafico che rappresenta una rotazione completa dell'utensile (Figura 3).

Risultati e Discussione

In questo paragrafo si riporta un caso di studio per dimostrare la fattibilità dell'approccio presentato. Si è scelta una fresa "flat end mill" in metallo duro rivestito in TiAlN Dormer S150.5 ($D_c = D_{c,nom} = 500 \mu\text{m}$, numero di taglienti = 2, raggio dello spigolo tagliente $r_e = 4 \mu\text{m}$, angolo di spoglia frontale nominale = 0° , angolo dell'elica = 30°). L'operazione di microfresatura oggetto di studio è caratterizzata dai seguenti parametri: $f_n = 6 \mu\text{m}$; $a_b = 0.05 \text{ mm}$, $a_e = 0.250 \text{ mm}$; $n = 8850 \text{ rpm}$; fresatura discor-

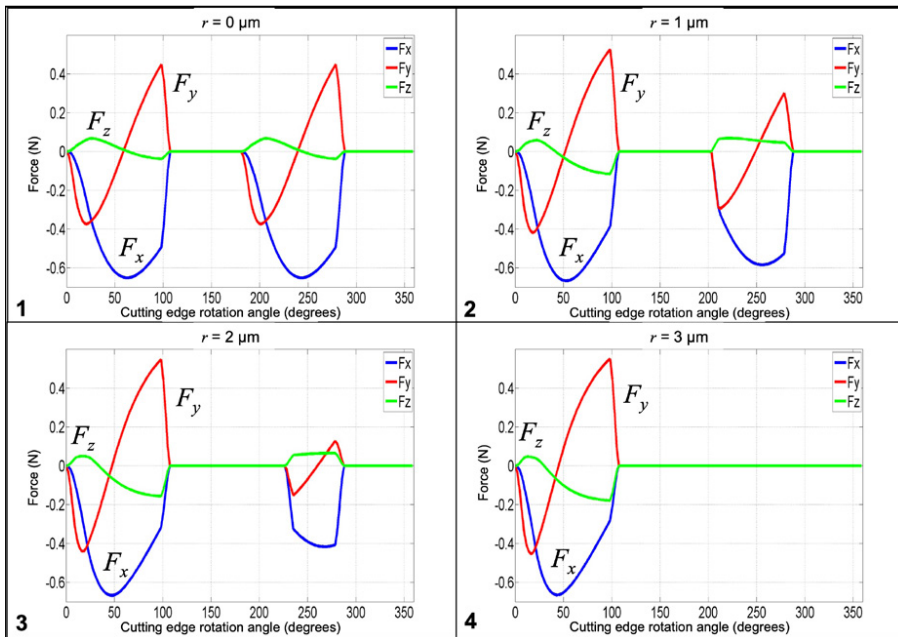


Figura 4. Output del modello di previsione delle forze di taglio (fresa Dormer S150.5, $a_p = 0.05$ mm, $a_e = 0.250$ mm; $n = 8850$ rpm; fresatura in discordanza; materiale del pezzo: Alluminio 6082T6; $f_{z,i}$, $a_{e,i}$ e φ_i indicati nella Tabella 1 in funzione di r). La fresa avanza in X positive (v. Figura 1) e le forze sono viste dalla fresa.

tà della fresa. Ad esempio, se lo stress prodotto dal valore di picco di una componente della forza di taglio superasse la resistenza a trazione del materiale della fresa, l'algoritmo di previsione potrebbe avvisare l'utente, il quale potrebbe provvedere a migliorare le condizioni di runout, per esempio smontando e rimontando l'utensile nel tool holder, previa accurata pulizia oppure cambiando tool holder.

Si potrebbe anche prevedere la durata utensile nelle condizioni di runout rilevate e modificare eventualmente la situazione ancora prima di iniziare la lavorazione. ■

Riferimenti bibliografici

- (1) ISO 1101:2012(E), Geometrical Product Specifications (GPS) - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out.
- (2) ASME Y14.5-2009, Dimensioning and Tolerancing.
- (3) ASME B89.3.4-2010, Axes of Rotation: Methods for Specifying and Testing.
- (4) H.U. Lee, D.W. Cho, K.F. Ehmann, A mechanistic model of cutting forces in micro-end-milling with cutting-condition-independent cutting forces coefficients, ASME J. Manuf. Sci. Eng., 130 (2008).

de; materiale del pezzo: Alluminio 6082T6. Nella Tabella 1 si riporta una simulazione basata su un valore di diametro di volo $D_{c,1} = 503 \mu\text{m}$ alla velocità di rotazione di lavoro, causato dal runout e dall'inerzia. I valori di $f_{z,i}$, $a_{e,i}$ e φ_i previsti dal modulo di runout sono riportati in tabella in funzione dei diversi valori di r . Le forze conseguenti sono rappresentate nella Figura 4. Il modello usato per calcolare la previsione delle forze è stato calibrato con prove di taglio effettuate sul centro di microfresatura Kern Evo utilizzando la fresa sopra citata nelle stesse condizioni di (4) ($f_z = 2, 3, 4, 5 \mu\text{m}$, $a_p = 0.05$ mm, $a_e = 0.250$ mm, $n = 8850$ rpm, fresatura in discordanza, materiale del pezzo: Alluminio 6082T6, esperimenti replicati due vol-

te). I grafici della Figura 4 rappresentano le forze iniziando con il tagliente più ingaggiato nel taglio (tagliente 1); le forze del tagliente 2 seguono con un ritardo che dipende dalle intersezioni tra le traiettorie dei taglienti (Figura 2). Le forze sono positive quando agiscono sulla fresa lungo il verso positivo di un asse della macchina. Gli angoli di ingaggio effettivi φ_1 e φ_2 dipendono dalle relazioni tra r , f_n e a_e . Nel caso in cui r sia elevato come nella condizione 4 della Tabella 1, il tagliente 2 viene escluso dall'operazione di taglio e il tagliente 1 affronta forze e usura maggiori con una conseguente riduzione della durata dell'utensile. Futuri sviluppi del lavoro potrebbero utilizzare le informazioni fornite dalle forze di taglio previste per impostare criteri di valutazione dell'idonei-

| Dati dal VTS | | Output del modulo di runout del modello | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------------|---|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| | $D_{c,1}$ (μm) | Tagliente 1 | | | | | Tagliente 2 | | | | |
| | | r (μm) | $f_{z,1}$ (μm) | $a_{e,1}$ (μm) | A_1 (μm^2) | φ_1 (degrees) | $D_{c,2}$ (μm) | $f_{z,2}$ (μm) | $a_{e,2}$ (μm) | A_2 (μm^2) | φ_2 (degrees) |
| 1 | 503 | 0 | 3,0 | 251,5 | 754,5 | 90 | 503 | 3,0 | 251,5 | 754,5 | 90 |
| 2 | 503 | 1 | 4,3 | 251,5 | 1100 | 90 | 501 | 1,7 | 236,5 | 394 | 70,1 |
| 3 | 503 | 2 | 5,3 | 251,5 | 1350 | 90 | 499 | 0,7 | 186,3 | 136 | 47,9 |
| 4 | 503 | 3 | 5,9 | 251,5 | 1509 | 90 | 497 | - | - | - | - |

Tabella 1: Output del modulo di runout nel caso di: $D_c = D_{c,nom} = 500$; $D_{c,1} = 503 \mu\text{m}$; $f_n = 6 \mu\text{m}$; $a_e = 250 \mu\text{m}$; fresatura in discordanza, $r = 0, 1, 2, 3 \mu\text{m}$.