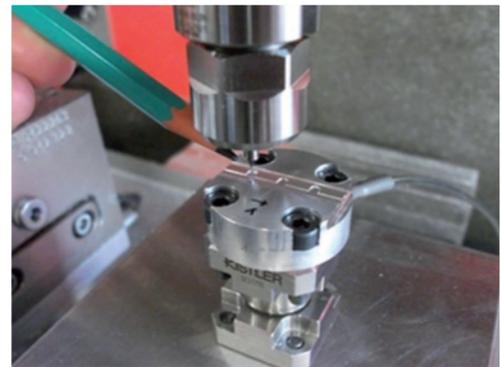


NUOVE SFIDE PER LA MICROFRESATURA

Paolo Parenti

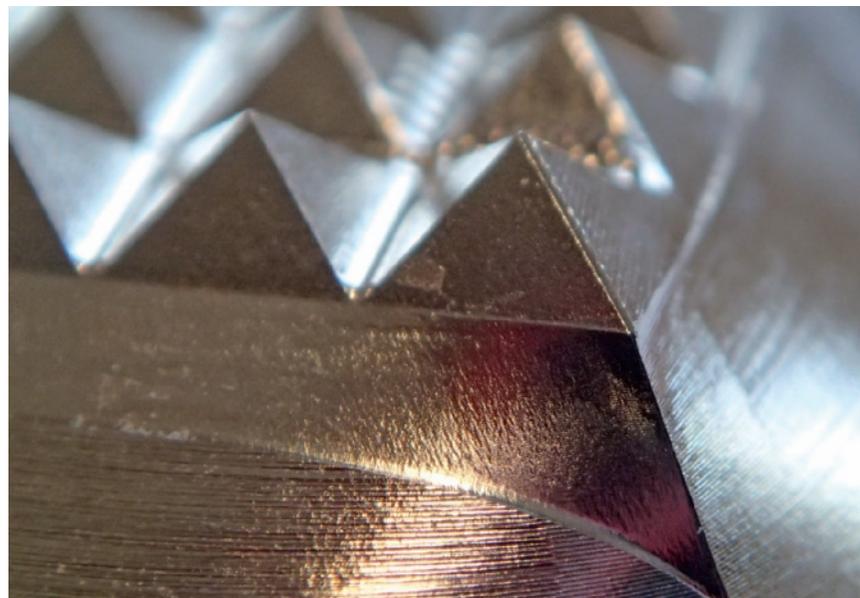
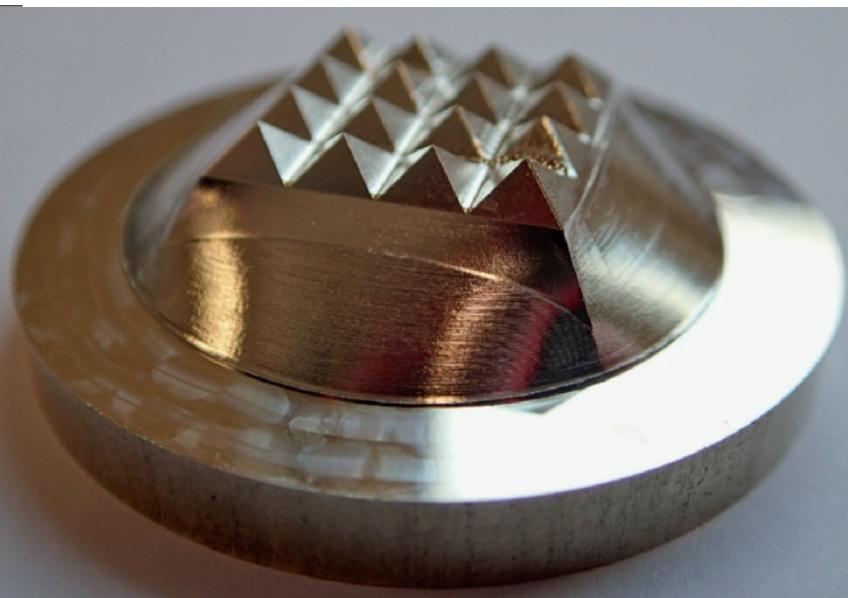
Setup per l'acquisizione di forza in microfresatura (Dfresa=0.2mm) presso MI_crolab [6]



LA MICROFRESATURA RAPPRESENTA UNA DELLE REALTÀ INDUSTRIALI PIÙ ECCITANTI PER LA PRODUZIONE DI MASSA DI MICROCOMPONENTI A GEOMETRIA 3D CON TOLLERANZE SUBMICROMETRICHE. QUESTO PERCHÉ, OLTRE ALLA FLESSIBILITÀ SULLA GEOMETRIA, VI È UN'AMPISSIMA GAMMA DI MATERIALI METALLICI E NON - POLIMERI, CERAMICI, ETC - CHE POSSONO ESSERE LAVORATI CON COSTI DI IMPIANTO RELATIVAMENTE CONTENUTI, RISPETTO ALLE TECNOLOGIE CONCORRENTI.

In senso assoluto la microfresatura non può essere definita come una realtà emergente in quanto è già affermata in settori industriali ben definiti il cui insieme, però, è in continua crescita. E' naturale percepire come una grande sfida la produzione di componenti così piccoli da essere difficilmente visibili a occhio nudo, la cui movimentazione e misura sono impossibili a mani nude e diventano possibili solo grazie all'ausilio di strumenti ad alta tecnologia. Diversamente da altri ambiti industriali, l'esistenza del mondo micro è sostenuta da questa spintissima tecnologia e dalle invenzioni più spinte che l'uomo è riuscito a

confezionare per l'industria manifatturiera: macchine automatiche con precisioni inferiori al millesimo di millimetro, mandrini con velocità di rotazione che superano il centinaio di migliaia di giri al minuto, utensili con dimensioni pari a frazioni di millimetro e strumenti di misura 3D capaci di risolvere poche decine di nanometri con le quali misurare i pezzi prodotti. Il mondo della microfresatura è estremamente variegato in quanto comprende non solo la lavorazione di componenti dalle dimensioni propriamente micro (dimensioni massime <1-2 mm) con microfresche dal diametro <500µm, ma anche la lavorazione di features geometriche/superficiali dalle caratteristiche micro ricavate su pezzi dalle dimensioni tipiche del mondo macro. I principali settori trainanti per la microfresatura sono da sempre i settori della micromeccanica ed orologeria, dell'elettronica, dell'automotive, il mondo degli stampisti e utensileria (es. microiniezione ed estrusione della plastica, elettrodi per EDM, etc.). Negli ultimi tempi tuttavia altri importanti settori quali, il biomedicale (es. impianti dentali, microchirurgia), la microfluidica e la microenergetica, sono emersi prorompentemente generando nuovi stimoli per il settore. Tutti questi settori, apparentemente chiusi in se stessi come continenti autonomi, in realtà sono più o meno interconnessi tra loro in funzione di specifiche



opportunità e sinergie. Alla luce di questa complessità si è legittimati nell'affermare che il mondo delle lavorazioni di fresatura "micro" non è tale, quando si parla di sfide tecnologiche da affrontare.

Differenza tra macro e microfresatura

Conviene scendere nel dettaglio del meccanismo di asportazione per comprendere le difficoltà del processo di taglio di microfresatura. Sebbene le similitudini con la fresatura tradizionale "macro" siano tante, un processo di microfresatura efficiente non può nascere da una semplice scalatura delle dimensioni/geometrie degli utensili e dei parametri di taglio a causa del cosiddetto effetto di scala. Tale effetto predominante è causato dal fatto che i microustensili hanno raggi di onatura dei taglienti comparabili con gli spessori di truciolo adottati ($<5/10\mu\text{m}$) rendendoli perciò "poco affilati" rispetto alle frese dalle dimensioni maggiori. Ciò causa l'instaurazione di fenomeni di riscaldamento del truciolo e di generazione di elevato attrito, denominati "ploughing" e "rubbing", che predominano le fasi di taglio in cui lo spessore asportato di materiale è basso (tipicamente nelle fasi iniziali e finali dell'ingaggio radiale della fresa). D'altro canto raggiungere le velocità di taglio consigliate dai costruttori degli utensili (100-200 m/min per microfresate integrali in carburo di tungsteno) non è cosa facile in quanto si devono adottare elevatissime velocità di rotazione mandrino tutt'altro facili da gestire. Per prima cosa a tali regimi ogni fenomeno dinamico, come gli sbilanciamenti, si amplifica e si aggrava per effetto dell'aumentata cedevolezza dinamica della struttura che lo pone in rotazione (vibrazioni forzate e risonanze strutturali). Ciò comporta alti rischi per le microfresate in quanto si generano errori sulla traiettoria nominale dei taglienti (cioè runout dinamico che si somma a quello geometrico già presente a livello costruttivo) di entità paragonabile agli spessori di truciolo, comportando variazioni di carico tra i taglienti e minando fortemente la loro vita utile. In secondo luogo tali elevati regimi creano

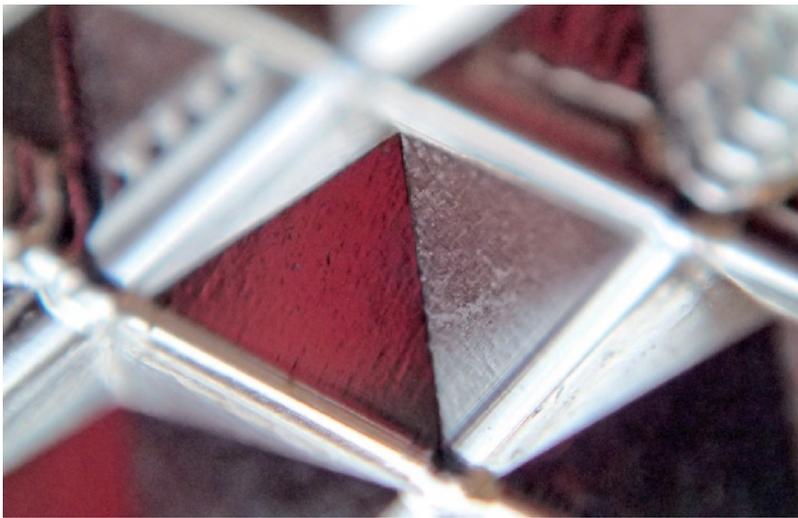
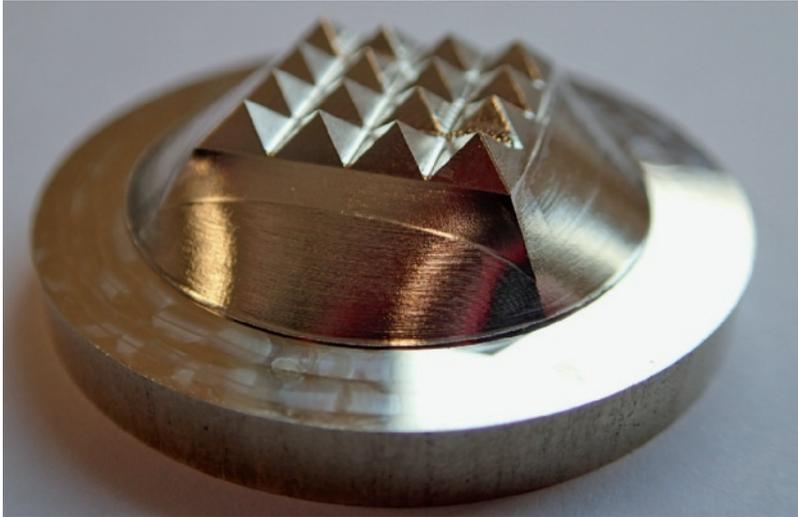
dissipazioni termiche nei mandrini e nella struttura delle macchine con conseguenti elongazioni termiche che devono essere adeguatamente misurate e compensate in quanto diventano comparabili con le grandezze in gioco come le profondità di taglio, con enormi rischi tecnologici sull'accuratezza e affidabilità di processo. Alcuni produttori di centri lavoro micro come Kern [1] e Kugler [2] integrano delicate logiche di compensazione termica nelle loro macchine a salvaguardia del problema che ciò nonostante è ancora un problema laddove si voglia spingere le accuratezze dimensionali oltremodo. In virtù di queste difficoltà e dell'estrema sensibilità delle microfresate alle forze di taglio (dovuta alla loro sottile geometria e al materiale), un planning efficace delle operazioni di taglio non può altro che basarsi su sistemi di presetting in grado di misurare lunghezza, diametro di volo e run-out delle microfresate alle effettive velocità di lavoro – cosa tutt'altro banale - e per questo è necessario avvalersi di sistemi innovativi che riescano in tale scopo. Nel mercato tuttavia sono pochi gli strumenti che riescono in ciò ed uno di questi è prodotto dall'azienda italiana (cioè il Marposs® VTS [3]). Come questi aspetti, ne esistono tuttavia molti altri che differenziano sostanzialmente le lavorazioni micro da quelle macro come la già citata elevata cedevolezza statica delle microfresate, la loro suscettibilità al cosiddetto fenomeno del chip clogging (problema di evacuazione del truciolo) e la loro tendenza a generare bave comparabili per dimensioni alle geometrie lavorate.

Un processo di taglio "a porte chiuse"

La grande sfida che un tecnologo di micro-fresatura deve affrontare è riuscire ad osservare e comprendere l'esecuzione del processo di taglio per capire se si stia svolgendo per il meglio (e prima di tutto se si stia svolgendo). I bassi tassi di asportazione raggiungibili ($\text{MRR} < 10/20 \text{ mm}^3/\text{min}$) comportano energie dissipate nel taglio così basse che in molti casi nessuna percezione ottico-auditiva consente all'operatore di

Pezzo dimostrativo
in lega di ottone
fresato con micro-
fresse in carburo
di tungsteno di
tipo ball-end
D=0.5/1mm presso
MI_crolab [6]

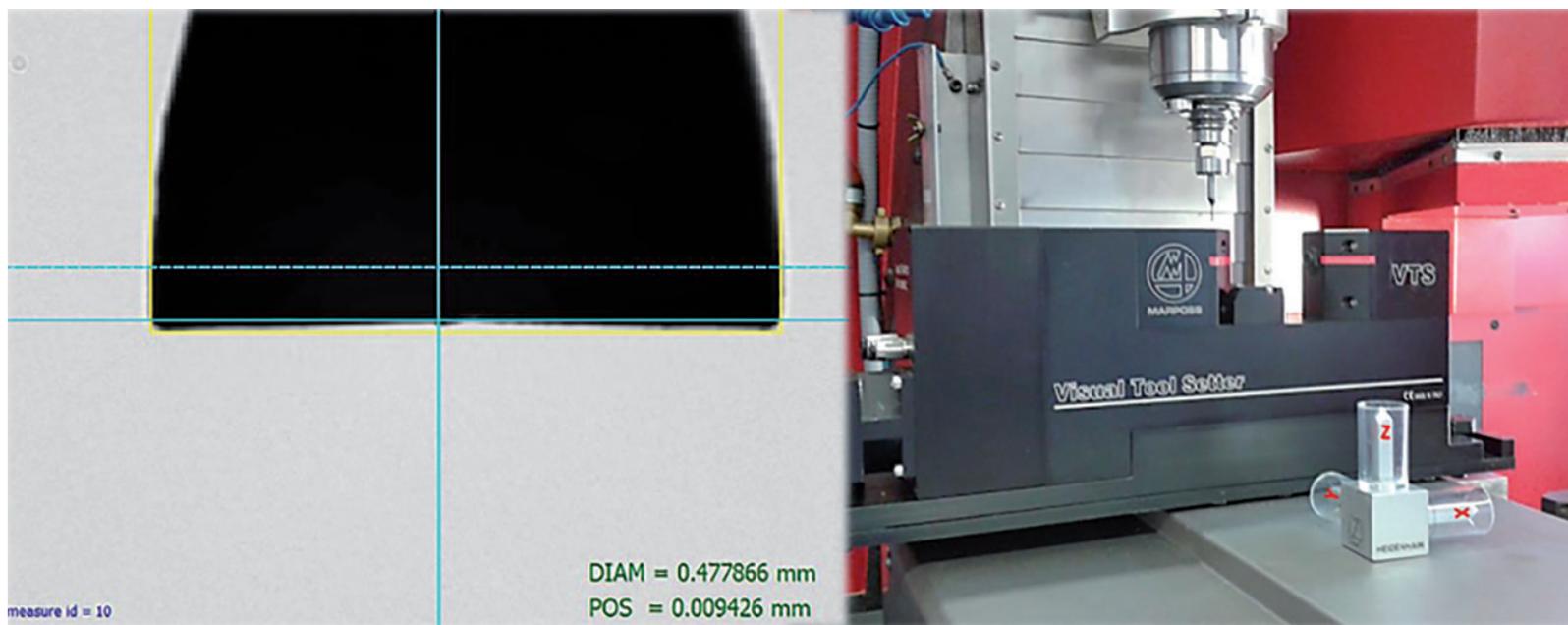
comprendere cosa stia succedendo rendendo quindi complicato ogni azione di controllo di processo. In questo senso vengono in aiuto sensori come quelli ad emissione acustica (AE) che consentono di vigilare sul processo di taglio sfruttando l'estrema loro sensibilità nel diagnosticare l'energia dissipata dal contatto tra utensile e pezzo [4]. Tali sensori, non sono da confondere con i normali sensori di pressione sonora (cioè i microfoni) dato che sono capaci di catturare la propagazione strutturale di onde superficiali ad una frequenza (100Khz-2MHz) ben oltre il campo dell'udibile (20Hz-



20KHz). Sebbene in rettifica essi siano molto utilizzati, in microfresatura la loro diffusione come sensori di tocco e monitoraggio di processo è ancora limitata, a causa della complessità dei meccanismi di taglio coinvolti che impediscono una piena sfruttabilità delle informazioni catturate. Purtroppo gli altri sensori tradizionalmente impiegati in asportazione di truciolo come accelerometri, sensori di corrente assi e gli stessi microfoni, trovano un'utilizzabilità limitata a causa dei loro limiti intrinseci di banda passante (una vibrazione prodotta dalla microfresa può superare i 100KHz) e perciò l'automazione e la supervisione del processo di microfresatura rappresenta una sfida che non è ancora stata vinta. Non è certamente tutto qui il quadro di sfide attuali e future in microfresatura in quanto ve n'è un ulteriore elevato numero - riguardante le performance delle macchine e dei software CAM, il materiale e la geometria degli utensili, i materiali lavorati e le loro caratteristiche - che continua a richiedere attenzioni sotto la pressione delle richieste ad elevato contenuto tecnologico dei sopracitati settori industriali.

Ricerca internazionale nel settore

Numerosi sono stati gli interventi sulla microfresatura durante la conferenza congiunta 4M/ICOMM 2015 [5], unione delle rispettive conferenze annuali delle due associazioni più importanti per il settore ossia l'International Institution for Micromanufacturing I2M2 per gli USA/Canada e 4M Association per l'Europa. Tale evento organizzato in Italia dal dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano (in particolare dal laboratorio MI_crolab [6]) e dall'Istituto di Tecnologie Industriali e Automazione del CNR (ITIA-CNR) si è appena concluso con più di 200 persone e un notevole numero di sponsor industriali presenti (tra gli altri GF Machining Solution, Marposs, Mitutoyo, Mikron Tool, Willemin-Macodel). Durante questo avvenimento dal profilo accademico - assoluto riferimento internazionale - si è parlato di ottimizzazione di parametri di taglio in microfresatura di materiali difficili da lavorare come le leghe di titanio, gli acciai inossidabili superduplex, gli acciai per utensili e addirittura i wafer di silicio, con interessanti interventi sull'utilizzo di microustensili rivestiti in PCD (Polycrystalline Diamond tools) che garantiscono elevatissime durezza superficiali. Si sono discusse anche metodologie per l'ottenimento di spintissime accuratezze di planarità tra superfici, di metodologie per la valutazione delle performance di microfresatura considerando innovativi metodi di misura dei componenti come la micro tomografia computerizzata e le macchine di misura 3D basate sul principio ottico di Focus Variation. Sono stati presentati innovativi metodi di lubrificazione a



RIFERIMENTI

- [1] <http://www.kern-microtechnik.com/en/home/>
- [2] <http://www.kugler-precision.com/>
- [3] http://www.marposs.com/product.php/eng/camera_tool_setting
- [4] I.Inasaki, Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes, Ultrasonics, Vol.36 1-5.
- [5] Dipartimento di Meccanica - Politecnico di Milano - sezione Tecnologie Meccaniche e Produzione (laboratorio MI_crolab) - <http://tecnologie.mecc.polimi.it>
- [6] International Conference on Micromanufacturing - 4M/ICOMM2015 - www.4m-icomm-2015.polimi.it
- [7] M. Strano - Macchine Utensili - Mese di Settembre 2015 – Tecniche Nuove

nanoparticelle basati sul principio della lubrificazione minimale, e innovativi metodi di modellazione delle forze di microfresatura e dei fenomeni dinamici che interessano il taglio (vibrazioni e chatter) che sfruttano codici di calcolo come il metodo agli elementi finiti (FEM) e la molecular dynamics (MD). Per finire, si è parlato anche di microlavorazioni per asportazione di truciolo non convenzionali come la microfresatura assistita da vibrazioni ad alta frequenza e di processi di taglio “ibridi” microfresatura/microlaser – entrambi metodi con un elevatissimo grado di innovatività.

Additive Manufacturing, Tecnologie Ibride e ... microfresatura!

Nel corso degli ultimi tempi il concetto di manifattura di tipo “additivo” sta fortemente smuovendo il mondo manifatturiero tradizionale introducendo nuovi paradigmi e modi di concepire la produzione anche, soprattutto, considerando componenti

in materiale metallico [7]. Il mondo della micro-manifattura tuttavia non è stato perturbato in ugual misura, in parte perché per sua natura tale mondo è estremamente mutevole e quindi capace di rimodellarsi velocemente per seguire tecnologie innovative ma soprattutto perché tecnologie di questo tipo non riescono a sostituirsi integralmente alle tecnologie sottrattive tradizionali in materia di tolleranze e accuratezze garantite. In questo contesto di continua evoluzione la microfresatura e la fresatura di precisione non potranno quindi che ricoprire un ruolo fondamentale di integrazione con queste nuove tecnologie; dovranno continuare ad evolversi per riuscire a rendersi indispensabile nel raggiungimento delle spinte tolleranze funzionali che animano, come discusso, sempre più settori. La microfresatura in particolare dovrà essere in grado di garantire i risultati richiesti su componenti dalle geometrie sempre più complicate, sempre più difficili da staffare e composti da materiali caratterizzati da alti gradi di anisotropia (sicuramente in termini di micro durezza, ma anche in altre caratteristiche) che spesso i processi di additive manufacturing attuali non sono in grado di evitare. Estrapolando da queste considerazioni, si può facilmente concepire il breve futuro come animato dall'integrazione delle microfresature con queste nuove tecnologie sotto forma di macchine ibride in grado di eseguire lavorazioni multiple. Se a questo aggiungiamo l'estrema utilità di essere in grado di condurre misure in macchina senza distaffare il pezzo, e quindi di integrare sensori di misura a bordo, il quadro evolutivo del settore di microfresatura è ben definito. Non rimane che l'arduo compito, assegnato ai principali attori industriali supportati dai centri di ricerca universitari, di portare a compimento tale svolta che dovrà avvenire in tempi brevi per evitare il completo sopravvento ad opera delle altre tecnologie innovative di produzione.

Systema di Presetting per microfresatura “Visual Tool Setter” – Marposs SpA [3]