

Il controllo microscopico di microfori su lamierini.

(Microfori EDM al microscopio)

Giuseppe Pellegrini, Università degli Studi di Bergamo

### **Abstract**

Nel presente lavoro si vuole testare l'impiego di tecniche di rilievo ottico per la caratterizzazione di microcomponenti. In particolare, è stata realizzata una serie di microfori con diametri compresi tra 0.3 e 0.4 mm, utilizzando una particolare tecnica di micro elettroerosione. I particolari ottenuti sono quindi stati osservati al microscopio ottico per consentire il rilievo dei diametri lavorati e la valutazione della loro conicità. Una successiva indagine con un microscopio elettronico a scansione (SEM), che permette di ottenere una profondità di campo molto maggiore, consente di apprezzare ulteriori dettagli delle superfici lavorate e mettere in rilievo la presenza di gocce di materiale in prossimità del bordo dei fori, generate dal processo di elettroerosione. Si presenta infine un esempio di tomografia computerizzata, che consente di studiare l'intera superficie interna del foro, sfruttando tecniche di radiografia con raggi X.

### **Introduzione**

La produzione di componenti di dimensioni sempre più piccole sta suscitando un interesse crescente da parte di produttori e ricercatori. Il mondo delle microlavorazioni è estremamente vario, poiché abbraccia produzioni di pezzi meccanici di dimensioni limitate (millimetri o frazioni di mm) ma arriva al confine con il campo delle nanotecnologie, occupandosi della lavorazione di dettagli con dimensioni di qualche micrometro. Anche se ci si vuole limitare alle microlavorazioni in senso stretto (se si escludono ad esempio molte delle tecniche di produzione dei dispositivi MEMS, Micro Electro-Mechanical Systems, che sono più simili alle tecniche di deposizione su strati di silicio utilizzate per i componenti elettronici) il mondo dei componenti piccoli presenta problemi e soluzioni nuovi. Sia le tecnologie di produzione dei microcomponenti che le tecniche utilizzabili per il loro controllo devono essere scelte con attenzione ed, in generale, adattate alla scala dei pezzi da ottenere. Anche le tecnologie di lavorazione sono molteplici: accanto alle lavorazioni meccaniche tradizionali, basate sull'asportazione di truciolo, si utilizzano processi non convenzionali come il laser, l'elettroerosione, le lavorazioni con ultrasuoni ecc.

Se si riduce la scala degli oggetti da produrre, ci si trova ad affrontare problemi nuovi o in ogni caso a vedere sotto una luce nuova i problemi "classici". I pezzi sono in generale molto più deformabili e, nel caso delle lavorazioni meccaniche, trucioli molto sottili presentano una resistenza molto elevata (per unità di superficie); questo, combinato con le inevitabili deformazioni elastiche, rende difficoltosa la formazione stessa dei microtrucioli. Anche l'aspetto delle vibrazioni richiede accorgimenti specifici e sono sul mercato macchine utensili dedicate alle microlavorazioni. Problemi analoghi devono essere risolti anche per quanto riguarda le lavorazioni non convenzionali per la realizzazione di dettagli su piccola scala: laser con altissima densità di energia per generare superfici precise e elettroerosione con scariche ad elevata frequenza per contenere il gap, ossia la "lunghezza" dell'arco elettrico.

Anche il controllo dei microcomponenti presenta criticità peculiari: il tradizionale metodo di controllo con contatto (calibri e tamponi) non è talvolta praticabile o, più spesso, può non essere la scelta ottimale e viene

spesso sostituito o integrato con tecniche ottiche. A titolo di esempio, si riportano alcuni risultati relativi all'osservazioni di fori ottenuti per (micro) elettroerosione su lamierini di acciaio al carbonio. In questo tipo di processo, viene fatto scoccare un arco elettrico tra il pezzo da lavorare ed un elettrodo: l'energia della scintilla generata provoca la rimozione del materiale intorno all'elettrodo, che genera una cavita' che corrisponde alla sua forma. Le dimensioni della cavita' generata dipendono dalla forma dell'elettrodo, dalla distanza tra elettrodo e pezzo (il gap) e dal consumo dell'elettrodo stesso, che nel caso delle microlavorazioni e' particolarmente rilevante e non puo' essere trascurato.

### **Rilievo del diametro mediante microscopio ottico e microscopio elettronico.**

Nel caso in esame, lamierini aventi spessori di 1.0 e 1.5 mm sono stati lavorati utilizzando un elettrodo di ottone di forma tubolare, con diametro esterno di 0.3 mm e diametro interno di 0.12 mm. Sono state provate diverse condizioni superficiali dei provini:

- nessun trattamento (solo lavaggio con acetone);
- decapaggio in HCl;
- levigatura con carte abrasive fino a 600 Grit.

I fori cosi' ottenuti sono stati successivamente analizzati con microscopio ottico ed a scansione.

L'osservazione dei campioni puo' essere condotta con diverse tecniche di microscopia, ottica ed elettronica. Il microscopio ottico e' teoricamente limitato da fenomeni di diffrazione della luce ma puo' comunque distinguere (risolvere) oggetti diversi posti ad una distanza di 0.2 millesimi di millimetro. Per effettuare misure di lunghezze e' necessario calibrare lo strumento utilizzando campioni di riferimento di lunghezza nota. Una limitazione importante di questa tecnica e' la limitata profondita' di campo, che impedisce di osservare oggetti tridimensionali (le parti poste ad una distanza diversa dal piano di messa a fuoco risultano invisibili). Il microscopio elettronico a scansione (SEM, Scansion Electron Microscope) consente risoluzioni maggiori (anche mille volte superiori di uno strumento ottico, *in condizioni ideali*) e soprattutto profondita' di campo elevatissime, consentendo di osservare lateralmente un oggetto. Le limitazioni principali riguardano la necessita' di effettuare l'osservazione sotto vuoto (che limita le dimensioni del pezzo e richiede la necessita' di avere un particolare "pulito" per evitare contaminazioni della camera), la presenza di distorsioni sistematiche (che limitano l'accuratezza delle misure dimensionali e/o richiedono correzioni software) e la necessita' di osservare campioni conduttivi; esistono tecniche per ovviare a questo inconveniente, che nel nostro caso (lamierini metallici) non si presenta.

La figura 1 riporta una coppia di immagini (a toni di grigio) ottenute al microscopio ottico, relative alle due superfici del lamierino, cioe' ai lati di ingresso e uscita dell'elettrodo. In questo caso il provino in osservazione e' levigato e le foto sono state ottenute utilizzando un obiettivo con ingrandimento modesto (50x) che ha premesso di generare un'immagine a 256 toni di grigio con risoluzione di 2048x1536 pixel. I valori medi dei toni di grigio sono riportati in funzione dalla distanza dal centro, come e' mostrato in figura 2, dalla quale e' possibile valutare i diametri dei fori che risultano essere rispettivamente di 593 e di 535 pixel. Per ottenere una misura e' bene utilizzare un'immagine campione di dimensione nota, da cui si ottiene il fattore di calibrazione, ossia la lunghezza di un pixel che nel caso considerato risulta essere di 655.7  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ . La figura 3 mostra un esempio di un retino di calibrazione, costituito da cerchi di diametro controllato. In figura sono mostrati cerchi da 10, 25, 50 e 100  $\mu\text{m}$ , ma sono stati impiegati anche riferimenti piu' grandi, con dimensioni piu' vicine a

quelle dei particolari da osservare per migliorare l'accuratezza della calibrazione. Le immagini della figura 1 hanno pertanto diametri di 389 e di 351  $\mu\text{m}$ . Il foro risulta essere significativamente conico e, come sarà descritto in seguito, questo comportamento è attribuibile all'usura dell'elettrodo.

Le figure 4 e 5 mostrano un confronto tra immagini dello stesso foro (lato ingresso) ottenute con tecniche diverse. La figura 4 mostra un'immagine ottenuta con la stessa tecnica usata per ottenere la fig. 1 (relativa ad un provino decapato), mentre la figura 5 mostra lo stesso dettaglio fotografato al microscopio elettronico (da due differenti punti di vista). Si può osservare come alcuni dettagli (le gocce indicate con la freccia) sono totalmente invisibili nella foto al microscopio ottico, perché poste al di sopra del piano della lamiera, che coincide con il piano di messa a fuoco. Regolando la messa a fuoco del microscopio, è possibile osservare almeno in parte le gocce, ma il resto dell'immagine esce dal piano di fuoco e scompare letteralmente dal campo visivo. Le gocce sono in questo caso formate dalla solidificazione di parte del materiale fuso dall'arco e non rimosso dal dielettrico. In alcuni casi si comportano come corpi estranei che tendono ad occludere la regione del foro. Se il foro è impiegato per un accoppiamento meccanico (o controllato con un calibro passa-non passa) la presenza delle gocce può alterare la funzionalità del foro, mentre se il foro serve per il passaggio di un fluido l'effetto delle gocce è quasi sempre trascurabile.

La differenza tra le immagini dei microscopi ottico ed elettronico è evidente e la maggiore profondità di campo del SEM consente di rilevare immagini "di sbieco" per apprezzarne maggiormente le caratteristiche tridimensionali ed, eventualmente, di utilizzare tecniche di fotogrammetria 3D per ricostruire una parte della superficie (particolari troppo "interni" non possono essere ripresi in ogni caso).

### **Micro Tomografia**

Oltre alle tecniche mostrate, esistono altri procedimenti di indagine 3D di estremo interesse. La  $\mu$ -TC, microtomografia computerizzata è simile alla TAC usata in campo medico (Tomografia Assiale Computerizzata, perché si ottengono sezioni *assiali* del corpo umano). Il principio fisico di osservazione è basato sull'utilizzo di sorgenti a raggi X che, per il loro alto potere di penetrazione, attraversano il campione da studiare che è posizionato su un micro-manipolatore. In questo modo si ottengono numerose radiografie realizzate con angoli diversi e, da queste, si ricostruisce l'immagine tridimensionale utilizzando opportuni algoritmi (trasformata di Radon). La figura 6 mostra il risultato di un'indagine tomografica effettuata su microfori EDM ottenuti in modo del tutto simile a quelli discussi prima. Le immagini sono state ottenute con un dispositivo operante presso l'Università di Bergamo, in grado di ottenere (al momento) una risoluzione assoluta di circa 4  $\mu\text{m}$ . Il foro a sinistra è realizzato con un elettrodo pieno, mentre quello di destra è stato ottenuto con un elettrodo cavo del tutto uguale a quelli impiegati nella campagna precedente. Vale la pena di osservare che le figure rappresentano l'*interno* del foro. Si può notare la forma caratteristica di entrambi i fori, dovuta al consumo dell'elettrodo (maggiore in punta, dove il contatto con il pezzo inizia prima e dunque dura più a lungo) e la presenza di materiale non rimosso all'interno della cavità dell'elettrodo tubolare. Particolari di questo tipo sarebbero molto difficilmente rilevabili con altre tecniche.

### **Conclusioni**

La combinazione di diverse tecniche di rilievo ottico si dimostra in grado di caratterizzare molte caratteristiche di un microcomponente. Sono così ottenibili rilievi dimensionali: la tecnica ottica, con ingrandimenti fissi e immagini bidimensionali, si presta particolarmente per questo compito. Integrando le informazioni con i rilievi

SEM, inoltre, e' possibile mettere in evidenza ulteriori dettagli utili per una caratterizzazione completa delle geometrie lavorate. La disponibilita' di tecniche radiografiche in grado di definire i dettagli interni (o i particolari con pareti ripide ed alto rapporto profondita'/diametro) integra il quadro sulle possibilita' dell'indagine senza contatto.

E opportuno osservare che il rilievo di dimensioni lineari non e' sempre l'aspetto piu' importante. In diversi casi, la rispondenza alle specifiche di impiego e' legata a requisiti di funzionalita'; si pensi ad esempio ai fori per iniettori, per i quali la funzione di controllo del flusso di fluido prevale su considerazioni strettamente dimensionali. Componenti di questo tipo sono talvolta testati in esercizio, senza concentrare l'attenzione su singole informazioni geometriche del foro, come il diametro, la circolarita' o la conicita'.