



Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea triennale in Ingegneria Gestionale

LAVORAZIONI NON CONVENZIONALI MEDIANTE ELETTOEROSIONE: STATO DELL'ARTE E SVILUPPI FUTURI

Relatore: Ch.mo Prof. Enrico Savio

Laureando: Matteo Lombardo

Anno Accademico 2011/2012

Indice

Introduzione	5
Capitolo 1 - Fondamenti dell'elettroerosione a tuffo	
1.1 Principi fisico-chimici	7
1.2 Gli elettrodi	12
1.3 Il dielettrico	13
Capitolo 2 - Macchine per l'elettroerosione a tuffo	
2.1 Macchine a tavola fissa e vasca a scomparsa	15
2.2 Macchina a portale con tavola fissa	16
2.3 Nomenclatura degli assi e sistemi di riferimento	16
Capitolo 3 - Elettroerosione a filo: processo e caratteristiche	
3.1 Descrizione del processo	19
3.2 Strutture e caratteristiche delle macchine per elettroerosione a filo	20
3.3 Tecnica di lavorazione	21
Capitolo 4 – Microelettroerosione	
4.1 Principi fisico-chimici	25
4.2 Metodo dell'usura uniforme (UWM)	26
4.3 Limiti della miniaturizzazione	27
4.4 Sviluppi recenti nella microelettroerosione	29
Capitolo 5 – Altre varianti del processo	
5.1 Lavorazione assistita da vibrazione ultrasonica	33
5.2 Lavorazione a secco	34
5.3 Elettroerosione su materiali non conduttori	37
5.4 Effetto delle particelle conduttive nello sparking gap	37
Capitolo 6 - Tecniche innovative	
6.1 Modifica della superficie di stampi in acciaio mediante uso di polvere di tungsteno mescolata al fluido dielettrico	39
6.2 Praticabilità della compensazione dell'usura nella micro elettroerosione basata sul conteggio e la descrizione della popolazione delle scariche	42
6.3 Osservazioni	45

Conclusioni	47
Ringraziamenti	49
Bibliografia	51
Altri riferimenti	53

INTRODUZIONE

Nella presente tesina viene illustrata una lavorazione definita non convenzionale: l'elettroerosione. Questo argomento è stato scelto in quanto rappresenta un metodo di lavorazione per asportazione molto diffuso nella realtà industriale del territorio. A tal proposito è stata visitata "Simpa S.r.l.", azienda con sede a Marola (Vicenza), che lavora stampi per materie plastiche, la quale ha dato fin da subito la possibilità di visionare i macchinari atti a tale lavorazione dando così un risvolto tangibile alle informazioni raccolte nel presente lavoro.

Ci si è concentrati inizialmente sulle due varianti principali di questa lavorazione: elettroerosione a tuffo e a filo. Della prima si sono presentati i principi fisico-chimici per poi analizzare i parametri che si possono influenzare i risultati della lavorazione. Da notare come in quest'arte le variabili siano molteplici e legate tra loro, motivo per cui è difficile affermare che modificandone una si ottiene esattamente un determinato effetto, anzi si influenzano altri parametri che bisognerà correggere per ottenere il risultato cercato. Si è poi passati a illustrare i componenti principali del processo: elettrodo e fluido dielettrico. Infine si è voluto spiegare come sono le macchine che permettono tali lavorazioni. Per quanto riguarda l'elettroerosione a filo si è seguito il medesimo approccio evidenziando le principali differenze dalla tipologia prima trattata. È stato poi redatto un capitolo sulla microelettroerosione, fondata sui medesimi principi fisici ma caratterizzata da un setup funzionale differente ottimizzato per l'ottenimento della massima precisione. Al riguardo ha aiutato meglio a comprendere il funzionamento di tale tecnica l'esperienza nei laboratori di Rovigo dove sono state svolte prove pratiche eseguite con la macchina per microelettroerosione Sarix SX-200. Particolare attenzione è stata posta sull'evoluzione di questi processi a dimostrazione di quanto ci si può spingere nella miniaturizzazione delle geometrie realizzate. Infine si è voluto illustrare alcune ricerche, più o meno recenti, che sono state sviluppate e studiate con lo scopo di migliorare le prestazioni attualmente raggiunte e di conseguenza avere un ritorno economico, ambientale (in termini di riduzione dell'inquinamento) e qualitativo.

CAPITOLO 1

Fondamenti dell'elettroerosione a tuffo

Nel 1770 lo scienziato inglese F. Priestley scoprì l'effetto erosivo-distruttivo delle scariche elettriche sui conduttori metallici. Facendo ricerche per eliminare questo effetto che si manifesta sui contatti elettrici, gli scienziati sovietici B.R. e N.I. Lazarenko, nel 1943, ebbero l'idea di sfruttare l'effetto distruttore della scarica elettrica per sviluppare un procedimento controllato e applicarlo alla lavorazione dei metalli. Successivamente quindi misero a punto un processo di lavorazione per elettroerosione, chiamato così per il fatto che una serie di scariche elettriche prodotte fra due conduttori, immersi in un liquido dielettrico isolante, provocano il danneggiamento, in massima parte, su uno dei due, intaccando con delle microfusione il metallo di cui è fatto e producendo un cratere che è tanto più profondo quanto più lunga è la durata della scarica.

1.1 Principi fisico-chimici

Il processo di elettroerosione (EDM, electrical-discharge machining) avviene in immersione di un liquido dielettrico contenuto in una vasca ^[1]. La scarica avviene quando applicando una differenza di potenziale continua tra elettrodo e pezzo, gli elettroni accumulandosi acquistano una energia sufficiente a superare il gap (la distanza minima elettrodo-pezzo fra cui scocca la scintilla), andando ad impattare sul pezzo. La polarità della corrente deve essere tale che la scarica provochi una maggiore erosione sul pezzo che non sull'elettrodo. Generalmente il rapporto fra metallo asportato e usura dell'elettrodo è 99-99,5% con 0,5-1% di usura dell'elettrodo.

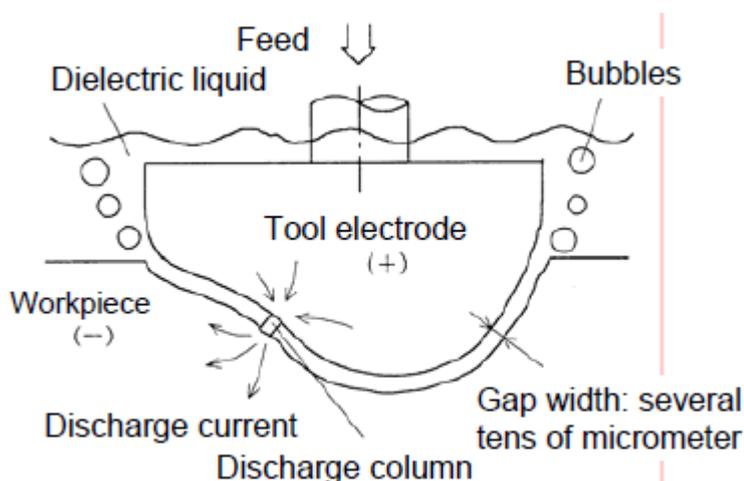


Figura 1: Elettroerosione a tuffo
Fonte: [6]

Si illustrano ora i fenomeni che avvengono nei pochi millisecondi in cui ha luogo la scarica.

Quando l'elettrodo utensile si avvicina al pezzo fino a una distanza minima per poter scoccare la scintilla, il sistema di controllo della

scarica chiude il circuito generando così un campo elettrico fra le due parti superficiali più vicine, cioè fra quelle che presentano maggiori asperità, e in questi punti si produce una parziale ionizzazione perché l'elettrodo negativo (pezzo) emette particelle negative (elettroni).

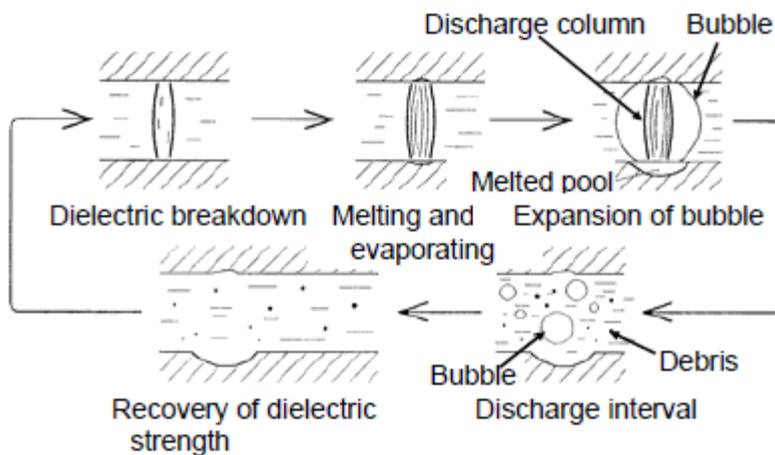


Figura 2: Fenomeni che avvengono durante la scarica
Fonte: [6]

Le particelle neutre che si trovano nel dielettrico vengono quindi scisse in negative e positive innescando così il processo chiamato ionizzazione per urto. (Questo processo consiste nella generazione di una canale di scarica e la formazione di una zona di plasma ad altissima temperatura). A questo punto il dielettrico non è più isolante, la tensione diminuisce e inizia il passaggio di corrente che dà origine alla prima fase di scarica. In queste condizioni si forma tra elettrodo e pezzo un canale di vapore e ha inizio il processo di fusione del metallo relativo ai punti in cui avviene la scarica. La tensione diminuisce ancora e la corrente aumenta fino a un valore costante con conseguente aumento della temperatura (6000-10000 °C), e pressione nella zona del canale di vapore; quindi la scarica elettrica e il calore raggiungono il valore massimo (fusione) con rapida espansione della bolla di vapore. Alla fine di questa fase viene interrotta la corrente elettrica (compresa in un intervallo da 0.1 a 500 A) aprendo il circuito automaticamente.

In concomitanza diminuisce il numero delle particelle conduttrici, cade la pressione e si spegne il canale di scarica. Il metallo fuso surriscaldato evapora in forma implosiva, la bolla di gas si restringe e nel fluido rimangono, in sospensione, parti metalliche, carbonio e gas che vengono asportati dalla zona di lavoro dal fluido stesso con il lavaggio.

Tali eventi si ripetono a frequenze elevatissime in funzione delle esigenze per cui è stata programmata la macchina. Il canale conduttore si forma fra due punti sempre variabili producendo un'erosione uniforme. Mantenendo costante il gap, l'erosione avviene gradualmente, prima livellando le sporgenze del pezzo e poi cominciando a riprodurre su di esso la sagoma dell'elettrodo.

Il tempo che intercorre fra una scarica e la successiva è chiamato tempo di pausa e si misura in millisecondi. Se la pausa è troppo breve si ha una grande asportazione di materiale, ma può capitare che se non si interrompe la scintilla si generi un arco elettrico continuo che provoca la fusione locale e incontrollata dell'elettrodo e spesso anche del pezzo. Se invece la pausa è troppo lunga si riduce il numero di scintille al secondo e diminuisce la velocità di erosione.

Bisogna prestare attenzione a non confondere la durata della scarica elettrica o di lavoro (TON) con il tempo di erosione, periodo in cui avviene il lavoro di elettroerosione, e l'intervallo di tempo (TOFF) in cui l'elettrodo si solleva per facilitare il lavaggio.

1.1.1 La distanza di scarica: i GAP

La distanza di scarica è una delle caratteristiche più importanti del processo elettroerosivo il cui valore permette o meno l'innesco del processo di lavorazione senza contatto diretto fra pezzo ed elettrodo. Vi sono vari tipi di gap ricorrenti nelle lavorazioni di elettroerosione a tuffo.

Gap statico: è il valore che si ottiene quando, dopo essere scoccata la scintilla di lavoro, l'elettrodo resta fermo e quindi possono aversi altre scintille. È il limite d'azione dell'elettroerosione.

Gap frontale e Gap laterale: definiscono il valore del gap misurato nella direzione dell'asse di avanzamento dell'elettrodo e perpendicolare ad esso. Il gap frontale ha uno spazio che varia da alcuni centesimi a qualche decimo di millimetro (0,025-0,125 mm) e viene determinato regolando l'elettrodo nel suo movimento lungo l'asse Z. Il gap laterale provoca l'allargamento della sede fra elettrodo e pezzo. È necessario quindi che l'elettrodo sia costruito più piccolo per compensare l'aumento dimensionale.

Gap limite: è la distanza massima fra l'elettrodo e il fondo dei crateri prodotti nella lavorazione di sgrossatura.

Gap orbitale (dinamico): è lo spazio elettrodo-pezzo misurato nella direzione perpendicolare a quella di orbitazione. Il suo valore è costante su tutta la superficie lavorata.

Gap medio: è lo spazio medio che viene misurato fra l'elettrodo, la cui superficie si considera per semplicità non intaccata dal fenomeno elettroerosivo (cosa che in realtà non è) perché il suo consumo è molto piccolo rispetto a quello subito dal pezzo, e la linea mediana dei crateri prodotti sul pezzo in lavorazione.

1.1.2 Polarità

La tensione elettrica applicata (solitamente compresa tra 50 e 380 V) è di tipo continuo, a impulsi, e quindi l'elettrodo potrà essere positivo o negativo rispetto al pezzo. L'usura dell'elettrodo-utensile sarà limitata se verrà scelta una polarità tale da produrre una maggiore concentrazione dell'energia di scarica sul particolare da lavorare. Per impulsi brevi l'elettrodo deve avere polarità negativa; viceversa con impulsi lunghi l'elettrodo deve avere polarità positiva. Normalmente nelle lavorazioni sia con elettrodo di grafite, sia di rame, si tiene la polarità positiva per avere minore usura degli elettrodi, mentre si ricorre alla polarità negativa solo per ottenere grosse asportazioni, ma in tal caso si usura l'elettrodo. La durata dell'impulso, che porta all'inversione di polarità, dipende da alcune caratteristiche fisiche del materiale usato per elettrodo a fronte del materiale da erodere.

1.1.3 Rugosità

La rugosità è lo stato della superficie dopo l'elettroerosione. Anche se a prima vista la superficie appare liscia, così non è perché le scariche elettriche hanno provocato l'erosione del materiale con la formazione di piccoli crateri. La qualità superficiale del particolare lavorato deve essere stabilita sia per la sua funzione sia per particolari accoppiamenti dei pezzi. Per tale motivo è stato definito un sistema di classificazione delle superfici suddivise in 12 classi di rugosità che ricoprono il campo dei valori che vanno da $R_a = 0,4 \div 18$ micron.

1.1.4 Velocità e tempo di esecuzione

La velocità di asportazione dipende fondamentalmente dalla corrente e dal punto di fusione del materiale del pezzo, anche se effetti minori possono essere dovuti ad altre variabili di processo quali la temperatura e la frequenza (compresa tra 50 e 500 kHz)^[2]. Le seguenti relazioni, di derivazioni empirica, possono essere utilizzate per una stima approssimata della velocità di asportazione in elettroerosione:

$$\text{MRR} = 4 \times 10^4 I T_w^{-1.23}$$

Dove MRR (material removal rate) viene espresso in mm^3/min ; I è la corrente in ampere e T_w è il punto di fusione del pezzo in $^\circ\text{C}$.

Nell'elettroerosione la velocità di asportazione del materiale è solitamente compresa tra 2 e 400 mm^3/min . Le velocità maggiori producono una finitura superficiale con proprietà scarse in termini di integrità superficiale e durata a fatica.

1.1.5 Rendimento

Si definisce rendimento η di un ciclo elettroerosivo il rapporto:

$$\eta = \frac{\text{tempo di lavoro}}{\text{tempo di ciclo}} \times 100 \text{ in } \%$$

(tempo di lavoro = durata dell'impulso, in microsecondi; tempo di ciclo = durata della pausa + durata dell'impulso, in microsecondi). Maggiore è il rendimento e maggiore sarà l'efficienza dell'asportazione.

La finitura o la qualità della lavorazione è invece legata alla frequenza dell'operazione che è definita da:

$$\text{frequenza del ciclo} = \frac{1}{\text{tempo del ciclo (secondi)}} \text{ in Hz}$$

$$\text{frequenza di scarica} = \frac{1}{\text{tempo di scarica (secondi)}} \text{ in Hz}$$

In conclusione sono da tenere in considerazione le seguenti regole fondamentali:

- L'energia della scarica dipende esclusivamente dalla corrente effettiva della scarica e dalla sua durata;
- Il tempo globale per l'asportazione di una data quantità di materiale dipende dalla frequenza della scarica;
- A parità di asportazione di materiale e di tempo di lavorazione totale, l'operazione ottenuta con una frequenza delle scariche maggiore dà una finitura migliore;
- A parità di intensità di corrente e di frequenza della scarica, l'asportazione del materiale è direttamente proporzionale al rendimento η del ciclo.

1.2 Gli elettrodi

La proprietà fondamentale che deve avere una materiale per la costruzione di elettrodi è la conducibilità σ (misurata in Siemens/m) ^[1]. Le altre caratteristiche che condizionano la scelta di un determinato materiale da elettrodo sono anche una buona capacità di asportazione di materiale e di resistenza all'usura, un alto punto di fusione, il grado di finitura ottenibile, la lavorabilità ed il costo. È sempre consigliabile fissare gli elettrodi a delle piastre di alluminio o di acciaio tramite viti per permettere il massimo passaggio della corrente elettrica tra supporto ed elettrodo. Solo in caso di pezzi molto piccoli, per i quali risulta impossibile usare viti o spine, è necessario incollare gli elettrodi con colla conduttrice di corrente oppure assicurare la conduttività tra la placca di fissaggio e l'elettrodo con una connessione elettrica. I principali materiali usati per la costruzione di elettrodi sono: rame-grafite, rame, rame-tungsteno, ottone, acciaio, grafite.

Il rame-grafite è un materiale combinato costituito da grafite impregnata di rame: in seguito a questo trattamento, il materiale conserva tutte le virtù della grafite, di cui però non ha la fragilità e in più possiede maggiore capacità di mantenere i particolari; tuttavia è leggermente più costoso.

Gli elettrodi in rame sono preferibili nella lavorazione di piccoli particolari, di superfici frastagliate e sagome miniaturizzate. Selezionando opportunamente i parametri elettrici, in questi casi si può ridurre l'usura dell'elettrodo quasi a zero, tanto che in alcuni casi lo stesso elettrodo è anche usato per la finitura.

L'acciaio, anche se ha un rendimento inferiore a quello ottenuto con il rame o con la grafite, è applicato nelle lavorazioni acciaio-acciaio di stampi usati nel settore delle materie plastiche.

Per quanto riguarda la grafite, i vantaggi rispetto al rame, in particolari lavori, sono:

- Minor consumo dell'elettrodo;
- Maggior velocità di erosione;
- Migliore lavorabilità alle macchine utensili;
- Basso peso specifico;
- Maggior resistenza al calore;
- La grafite non è tossica.

La grafite è facilmente incollabile ed è quindi possibile costruire separatamente parti diverse di elettrodi o, nel caso di errori di lavorazione o di rotture, sostituire una parte dell'elettrodo incollandone un'altra.

1.3 Il dielettrico

Il dielettrico è l'elemento liquido che deve compiere simultaneamente tre funzioni molto importanti e cioè: essere elettricamente isolante, liberare rapidamente la zona erosa dalle particelle di materiale, altamente abrasive, prodotte dopo la scarica erosiva e infine raffreddare la zona erosa ^[1]. Le particelle di materiale fuso, prelevate dalla zona di lavoro, sono trasportate dal dielettrico e trattenute da un sistema filtrante e refrigerante attraverso il quale passa il dielettrico prima di essere successivamente riutilizzato. Nell'elettroerosione a tuffo, tra la vasta gamma di fluidi dielettrici, sono adatti soltanto i composti idrocarburici (oli minerali molto raffinati) mentre l'acqua deionizzata si utilizza solo su pezzi molto piccoli. È necessario che i fluidi siano resistenti all'ossidazione provocata dalla scissione degli idrocarburi dovuta al massiccio flusso di energia e calore nella zona delle scariche. Il deterioramento del fluido viene rallentato progettando opportunamente l'impianto di ricircolazione e filtraggio, reintegrando quello deteriorato ed evaporato con fluido fresco. Il rabbocco è un'operazione apparentemente economica quando il fluido è fresco, ma poco conveniente alla lunga. I residui metallici, anche se in quantità minima, possono con l'andare del tempo non solo ostruire i canali e le tubazioni di ricircolo del fluido ma produrre archi voltaici spontanei che influiscono negativamente sulla precisione dimensionale della lavorazione e sulla finitura superficiale nei casi in cui il gap viene ridotto al minimo.

Premesso che la buona qualità di un dielettrico influisce fino al 30% sulla qualità della lavorazione del pezzo, si debbono analizzare le caratteristiche fondamentali che esso deve avere:

- Viscosità. È dovuta alle forze di attrito interne che ostacolano lo scorrimento di uno strato su un altro e varia con la temperatura. Da questa dipendono, in parte, la velocità di erosione e dell'usura dell'elettrodo; al crescere della viscosità aumenta la restrizione del canale di scarica che impedisce alle particelle erose di depositarsi rapidamente con conseguente poca facilità al fluido di rimuoverle. I fluidi per finitura e superfinitura devono avere bassa viscosità, da 1,75 a 2,35 m²/s; i fluidi per sgrossatura invece alta viscosità, da 6 a 8 m²/s.

- Punto di infiammabilità. La scelta dei fluidi deve essere fatta tra quelli che hanno punto di infiammabilità il più alto possibile e che abbiano lento grado di evaporazione per non dare luogo all'emissione di odori e di fumi nocivi alla salute.
- I contenuti aromatici. Sarebbe bene che questi fossero pari a zero, poiché hanno come elementi negativi l'essere cancerogeni e la tendenza a formare, sul materiale lavorato e in particolare sull'elettrodo positivo, lacche gombose che possono anche bloccare il processo elettroerosivo.
- Intervallo di distillazione. Un punto di distillazione elevato, infatti, significa minor tendenza all'evaporazione e quindi minor consumo del dielettrico.

Bisogna tenere presente che la pulizia continua e costante del dielettrico è un fattore molto importante. Una caratteristica peculiare dell'impianto di filtrazione è la portata, cioè il volume del fluido che passa attraverso i condotti nell'unità di tempo (si misura in m^3/s). L'impianto deve essere progettato per assicurare afflusso costante del dielettrico per tutto il tempo della lavorazione. La portata insufficiente può causare: surriscaldamento del pezzo, bassa velocità di erosione, maggiore usura dell'elettrodo, emissione di fumi densi, cattivo funzionamento della macchina. Al contrario un flusso eccessivo può ridurre la velocità di erosione e aumentare l'usura dell'elettrodo.

CAPITOLO 2

Macchine per l'elettroerosione a tuffo

La struttura costruttiva delle macchine per elettroerosione a tuffo può essere fatta in monoblocco, da fusione di ghisa perlitica, lavorata nelle varie parti e successivamente stabilizzata nel forno ^[1]. Può essere costruita anche in lamiera d'acciaio elettrosaldata e rinforzata con nervature opportune in modo da conferire al complesso rigidità monolitica; essa, quindi, viene posta nel forno di stabilizzazione per equilibrare le tensioni che sono state prodotte dalla saldatura.

La forma è usualmente a C e comprende il basamento ove è montata la tavola a croce portapezzi contornata dalla vasca porta elettrolita, il montante solidale col basamento (tranne nei casi di montante mobile) che reca nell'estremità superiore il canotto nel quale è fissata la testa di lavoro portaelettrodo. Il movimento verticale del canotto avviene tramite un cilindro idraulico o una vite a ricircolo di sfere azionata da un motore. Il sistema di fissaggio del porta elettrodo può essere di diversi tipi e forme in funzione del peso e dell'estensione dell'elettrodo. Il canotto e il suo sistema di traslazione debbono costantemente avere un alto livello di precisione negli spostamenti anche con carichi massimi montati sulla testa. Le forze flettenti sono assorbite dalla struttura portante della macchina per evitare di caricare le guide.

Sul basamento è fissata la tavola a croce, portapezzi, il cui spostamento, secondo la direzione degli assi X e Y, è fatto con viti a ricircolo di sfere che possono essere azionate manualmente, tramite volantini e lettura a nonio oppure mediante servomotori. La tavola generalmente è costruita in ghisa, ma in alcune macchine è in granito o in ceramica per ottenere un elevato livello di stabilità.

2.1 Macchine a tavola fissa e vasca a scomparsa

Poiché i tempi delle lavorazioni per elettroerosione sono relativamente lunghi, obiettivo primario dei costruttori è stato quello di fornire le macchine di sistemi di lavorazione e gestione automatici al massimo in modo da sfruttare le pause, le notti e i giorni festivi per produrre. Un primo passo verso l'automazione si ebbe con l'introduzione, nelle macchine a tuffo, della vasca a scomparsa prodotta e brevettata dalla società svizzera Agema. La vasca a scomparsa, infatti, permette la massima accessibilità alla tavola di lavoro, che in questo caso è fissa, e quindi una maggiore libertà per il posizionamento dei pezzi e relativi controlli. Essa consente anche di automatizzare il carico e lo scarico

dei pezzi, singoli o in pallet, nei casi in cui la macchina sia asservita, mediante robot di presa e scarico, ai magazzini esterni porta pezzi. Le macchine a tavola fissa hanno la testa portaelettrodo sostenuta da un montante mobile nelle direzioni X e Y oppure, se montata a portale, compirà i movimenti secondo le direzioni degli assi X e Z sul portale mentre questo si muove sulle guide di base secondo la direzione dell'asse Y. Si arriva così a costruire una cella di elettroerosione in cui la produzione dei pezzi può essere gestita automaticamente con lavorazione continua 24 su 24 ore spesso senza presidio umano.

2.2 Macchine a portale con tavola fissa

Le macchine a portale o a ponte si usano per la lavorazione di pezzi di dimensioni medio-grandi e peso massimo di circa 15000 Kg. In esse la tavola portapezzo è fissa e la testa portaelettrodo si muove sul portale, formato da una trave orizzontale solidale alle estremità con due montanti verticali di sostegno, le cui basi traslano su due guide d'appoggio (asse Y) poste sulla base della macchina o limitrofe alla vasca. La testa portaelettrodo trasla su guide riportate (asse X) sulla trave e ricoperte da soffioni protettivi. Il canotto, ampiamente dimensionato, esegue sia la traslazione verticale, asse Z, sia la rotazione. Le macchine a portale con vasca a scomparsa o fissa a pareti apribili sono vantaggiose anche perché permettono di caricare, sulla tavola, pezzi di peso elevato e di lavorare, senza difficoltà, in qualsiasi parte del piano di appoggio, fin nei punti più estremi. Permettono anche di lavorare più pezzi diversi o uguali fissati su tutta la superficie della tavola e sostituirli man mano che vengono finiti. Altro vantaggio è offerto dalla grande capacità della vasca di lavoro e dalla facile accessibilità sia dal lato frontale sia dall'altro.

2.3 Nomenclatura degli assi e sistemi di riferimento

Nelle macchine a controllo numerico è importante sempre conoscere la posizione del pezzo rispetto alla tavola e la posizione dell'elettrodo rispetto al pezzo e alla tavola. Gli assi della macchina per elettroerosione indicano le traslazioni, in direzione e verso, delle parti che possono spostarsi durante la lavorazione e cioè le traslazioni della tavola portapezzo nelle direzioni orizzontale X e trasversale Y, o in qualsiasi altra direzione del piano se i due movimenti sono coordinati. Nelle macchine con tavola fissa, la testa portaelettrodo eseguirà i moti di traslazione nelle direzioni degli assi X, Y e Z. La rotazione dell'elettrodo, eseguita dalla testa della macchina, è indicata con l'asse C il cui verso positivo è antiorario.

Se l'elettrodo è centrato (asse elettrodo coincidente con l'asse Z), la sua programmazione, di un certo angolo di rotazione, produce nel pezzo l'erosione angolare, che se è sincronizzata con la traslazione dell'asse Z genera un moto elicoidale. Se l'asse dell'elettrodo non è coassiale con l'asse Z ma spostato di una data misura da esso, con la rotazione si otterrà "l'orbitazione planetaria" attorno all'asse Z e ciò serve per riportare una sagoma lungo una circonferenza o per allargare una cavità precedentemente costruita.

Il movimento coordinato e contemporaneo di due o più assi anche a velocità diverse, secondo una traiettoria piana o spaziale, si chiama "interpolazione". Se uno di questi è l'asse C si chiama interpolazione circolare, mentre l'interpolazione si chiama lineare quando la traiettoria di lavorazione è ottenuta sincronizzando il moto di almeno due dei tre assi X, Y, Z. Con un solo elettrico cilindrico, per esempio, è possibile costruire una cavità di forma particolare programmando il moto contemporaneo di due o più assi evitando la costruzione di un elettrodo con la sagoma specifica e che probabilmente non si userà più, ciò con conseguente risparmio di tempo e denaro. Un'altra lavorazione eseguibile con l'interpolazione degli assi è la "contornatura" che è data dalla traiettoria percorsa dall'elettrodo quando lavora il contorno esterno o interno di una sagoma.

Agli assi della macchina è associato un sistema di lettura che serve per determinare la posizione del pezzo rispetto alla tavola e rispetto all'elettrodo utensile. Il sistema di lettura può essere lineare, a righe ottiche, se la lettura avviene nella direzione di traslazione degli assi X, Y, Z, oppure può essere rotativo, con encoder, se collegato all'asse della vite a ricircolo di sfere che comanda il movimento traslatorio. Un altro sistema di lettura, funzionante però con il principio delle correnti indotte, è il resolver che è usato solo per letture angolari.

CAPITOLO 3

Elettroerosione a filo: processo e caratteristiche

3.1 Descrizione del processo

Il processo fisico dell'elettroerosione a filo è identico a quello descritto per la lavorazione a tuffo [1]. Nella fase finale, infatti, appena si interrompe la corrente di scarica, il repentino

abbassamento di temperatura provoca l'implosione della bolla di gas dovuta alla vaporizzazione degli elettrodi (filo-pezzo) e del dielettrico generando delle forze dinamiche che proiettano il materiale fuso all'esterno del cratere. Il materiale eroso si risolidifica nel dielettrico sotto forma di piccole sferette che vengono portate via nella fase di

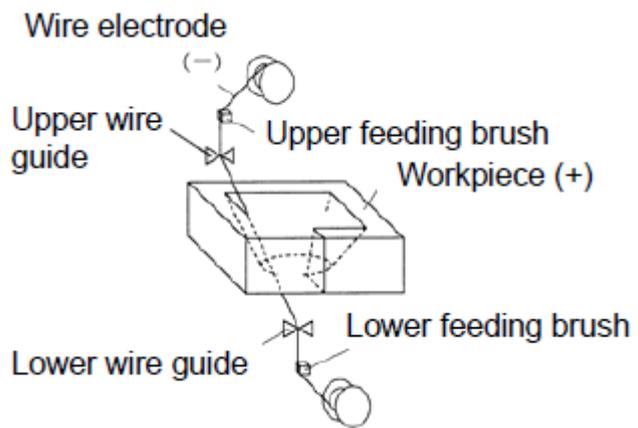


Figura 3: Elettroerosione a filo
Fonte: [6]

lavaggio. L'erosione sul sistema filo-pezzo è volutamente dissimetrica e dipende da molte variabili, tra cui principalmente polarità dei due componenti, durata e intensità della scarica. L'erosione a filo ha il vantaggio che il filo è sempre nuovo e la sua usura non modifica la precisione del taglio.

3.1.1 La distanza di scarica: GAP

Nell'avanzamento di taglio, il filo, inizialmente, si avvicina frontalmente al pezzo fino a una distanza minima, gap frontale, alla quale si tiene fermo. Facendo passare la corrente, scoccheranno, fra filo e pezzo, delle scintille che produrranno sul pezzo un solco di taglio la cui profondità aumenta inizialmente fino al punto in cui l'effetto della scarica elettrica non si ha più perché la distanza tra il filo e il pezzo diventa eccessiva per produrre lo scoccare della scintilla. La distanza di azione limite oltre alla quale è nulla la probabilità che la scintilla scocchi, si chiama gap asintotico. All'avanzare del filo nel pezzo, superata la zona del gap asintotico, le scintille non potranno più scoccare fra la parte posteriore del filo e il pezzo. La larghezza del solco è data da:

$$L = \varnothing \text{ filo} + (\text{gap radiale} \times 2)$$

Il gap radiale o laterale è anche chiamato overcut. A causa di questo gap è necessario programmare, per la lavorazione di sgrossatura e finitura, il percorso del filo spostato rispetto al profilo da realizzare, se si vuole ottenere la misura assegnata. Questa compensazione diametro-filo si chiama offset ed è ottenuto addizionando al valore del gap radiale la misura del raggio del filo.

3.1.2 Il filo

La qualità del filo è un elemento fondamentale per migliorare le prestazioni delle macchine. Vi sono in uso fili omogenei e fili compositi, cioè formati, per esempio, da un'anima in rame o di ottone e rivestita di zinco. Il materiale costituente il filo, che si ottiene per trafilatura, può essere di rame, ottone e acciaio al molibdeno, tungsteno o zincato; i diametri possono variare da 0,03 mm a 0,33 mm. Il filo uscente dalla zona di lavoro, a causa delle scariche elettriche, subisce un consumo, cioè una riduzione dimensionale della sezione per cui non può essere più riutilizzato.

3.2 Struttura e caratteristiche delle macchine per elettroerosione a filo

La struttura delle macchine per elettroerosione a filo è spesso monolitica ed è costruita in fusione di ghisa con opportune scatole e costolature d'irrigidimento. La forma può essere a collo di cigno a montante fisso nella cui parte superiore è fissata la testa portafilo con relativi accessori mentre il carro portapezzo si muove nelle guide a croce solidali col bancale. Anche se queste macchine non debbono sopportare grandi sollecitazioni dovute a vibrazioni durante le fasi lavorative, come le macchine per asportazione di truciolo, tuttavia esse debbono avere un elevato grado di rigidità strutturale per sopportare il peso, a volte elevato, del pezzo il quale si deve muovere solidale alla tavola i cui movimenti debbono essere non solo di altissima precisione ma anche permettere una soddisfacente precisione di ripetibilità di posizionamento. Il rilevamento delle posizioni è tramite trasduttori circolari o lineari. Questi forniscono al CNC continue informazioni della posizione della tavola con letture di misure incrementali dell'ordine del micron. Questa tecnica di lettura delle posizioni della testa e della tavola è detta a circuito chiuso perché il CNC riceve la posizione rilevata dai lettori e la confronta con quella programmata, correggendo automaticamente eventuali differenze riscontrate. Ciò avviene istante per istante.

3.2.1 Nomenclatura degli assi e sistemi di riferimento

Gli assi di una macchina per elettroerosione a filo sono:

- Due inferiori: gli assi X e Y per lo spostamento in piano del pezzo, bloccato alla tavola, in rapporto alla testa inferiore; sono azionati manualmente o automaticamente dal CNC
- Due superiori: gli U//X e V//Y, perpendicolari fra loro, i quali gestiscono lo spostamento della testa superiore, portafilo, secondo direzioni parallele agli assi inferiori; possono essere azionati dal CNC per eseguire conicità.
- Asse Z per il posizionamento verticale della testa. Quando nelle lavorazioni la testa si può spostare con continuità secondo la direzione dell'asse Z, allora la macchina si chiama a 5 assi; se invece la testa è azionata a quote fisse, e cioè per una programmata quota Z vengono eseguite successivamente lavorazioni secondo i precedenti quattro assi, allora si dirà che la macchina lavora con 4 assi e mezzo.

Le macchine per elettroerosione a filo sono usate specificatamente per il taglio da un massello di sagome con contorno semplice o complesso; il taglio può essere retto e cioè parallelo all'asse Z della macchina oppure obliquo con un dato numero di gradi rispetto a Z; è anche possibile eseguire un determinato contorno nella parte superiore del pezzo e un diverso nella parte inferiore. Con questa tecnica si possono costruire punzoni, matrici, stampi per tranciatura, matrici per estrusione, elettrodi. I vantaggi della tecnica EDM a filo sono innumerevoli e fra questi, in alcuni casi, l'eliminazione della rettifica perché la superficie di taglio che si ottiene con una o più passate di finitura è accettabile nella maggior parte dei casi. Gli stampi costruiti con questa tecnica, poiché si possono realizzare in un unico pezzo e non in tanti componenti come quelli che generalmente vengono costruiti con le macchine per asportazione da truciolo, hanno, nel complesso, una maggiore resistenza meccanica e strutturale. Le macchine per elettroerosione a filo hanno una gestione più semplice rispetto a quelle a tuffo e questa caratteristica, oltre a sviluppare nuovi metodi di lavorazione, ha destato l'attenzione degli utenti, specialmente per l'esecuzione di prototipi, in quanto, in alcuni casi, evita il dover fabbricare costosi elettrodi che a volte sono costruiti con le macchine a filo per usarli in quelle a tuffo.

3.3 Tecnica di lavorazione

Nelle macchine per elettroerosione a filo, l'elettrodo-utensile costituito da un filo in materiale ad alta conducibilità, si svolge a velocità programmata da una bobina carica per avvolgersi, dopo aver attraversato la zona di lavoro, su una bobina di recupero. Nella zona di lavoro il filo è tenuto verticale o in qualsiasi inclinazione da

due guide. Quella superiore si sposta nella direzione dell'asse Z e deve essere avvicinata il più possibile alla zona superiore del pezzo in lavorazione per evitare eccessive inflessioni del filo a migliorare la precisione del taglio. In quasi tutte le macchine l'inserimento del filo lungo tutto il percorso avviene automaticamente sia all'inizio della lavorazione sia nel caso di rottura dello stesso. Nelle lavorazioni che richiedono più infilaggi oppure in caso d'incidente che provoca la rottura del filo, l'eliminazione di questo dalla cavità in lavorazione e il reinfilaggio avvengono automaticamente. L'inserimento può essere tentato per un numero assegnato di volte e, in caso di insuccesso, dovuto ad un evidente difetto del foro praticato sul pezzo o per occlusione dello stesso a causa di residui solidi di lavorazione, non si interrompe la lavorazione, ma mediante comando del CNC si passa automaticamente al foro successivo la cui posizione è stata già programmata.

Un sistema che permette di ottenere un'elevata precisione di taglio è quello con le teste orientabili brevettate. La particolare concezione delle stesse, infatti, consente l'impiego di guide orientabili secondo l'inclinazione del filo. Queste si adeguano a qualsiasi angolo fino a 30°, per cui il filo non viene piegato nel foro di uscita e di entrata. Si ottengono così condizioni di taglio costanti e massima linearità delle superfici inclinate; anche in questo caso è possibile l'infilaggio obliquo automatico del filo per tutto lo spessore del pezzo lavorabile. Dopo l'introduzione del pezzo, il filo è trainato da un motore e la velocità di scorrimento può essere variata in funzione dello spessore, della qualità del taglio che si vuole fare e in funzione dei parametri elettrici predisposti. Generalmente, maggiore è lo spessore del pezzo, maggiore deve essere la velocità di scorrimento del filo. Il tensionamento meccanico del filo, che dipende dalla sezione, dalle caratteristiche fisiche dello stesso e dal tipo di materiale da lavorare, è regolato da un sistema frenante collegato al rullo di tensione e controllato dal CNC. Dal rilevamento dell'intensità di corrente assorbita dal sistema frenante è possibile risalire al valore della tensione meccanica.

3.3.1 Velocità

La velocità di asportazione viene espressa solitamente in termini di area della sezione lavorata in unità di tempo. Valori tipici sono 18000 mm²/ora per il taglio di acciaio con spessore 50 mm e 45000 mm²/ora per il taglio di alluminio con spessore di 150 mm. Tali valori consentono di calcolare una velocità lineare di taglio pari rispettivamente a 6 e 5 mm/min. La velocità di asportazione può essere ottenuta con l'espressione

$$\text{MRR} = V_f h b$$

Dove MRR viene espresso in mm^3/min ; V_f è la velocità di avanzamento del filo nel pezzo in mm/min ; h è lo spessore o l'altezza in mm ; b è la larghezza del taglio calcolata come $b = d_w + 2s$, dove d_w è il diametro del filo ed s è la distanza, in mm , tra il filo e il pezzo durante la lavorazione.

Il filo, dopo la sua introduzione nel pezzo, è trainato da un motore e la velocità di scorrimento può essere variata in funzione dello spessore del pezzo, della qualità del taglio che si vuole ottenere e in relazione ai parametri elettrici predisposti. Generalmente maggiore è lo spessore del pezzo, maggiore deve essere la velocità di scorrimento del filo. Essa può variare da 0,5 a 15 m/min a seconda delle lavorazioni. La giusta velocità di scorrimento del filo e il suo regolare svolgimento lungo tutto il percorso permettono di evitare un'usura troppo rapida dello stesso che potrebbe provocare la rottura. Tale velocità deve essere costante nel taglio di superfici piane parallele. Nel caso invece di superfici irregolari la velocità di scorrimento del filo varierà a seconda che l'altezza della sezione aumenti o diminuisca. I punti critici sono infatti i cambiamenti di forma, le entrate e le uscite dal pezzo, le lavorazioni in prossimità dei bordi. Alcuni esempi di strategie adattative geometriche sono:

- Attraversamento interspazi: in questa fase non c'è scintillio e quindi il filo riprende ad avanzare con velocità di avanzamento
- Modifica dell'altezza di taglio: nuovo adeguamento della velocità di taglio con avanzamento ridotto e aumento della potenza di scarica.
- Fessure: la larghezza è costante e quindi la potenza e l'avanzamento sono funzioni dello spessore del pezzo e della lunghezza della fessura.
- Raccordi conici: compensazione automatica della differenza di avanzamento variando la potenza nella zona di scarico.

3.3.2 Il lavaggio

Il lavaggio determina le prestazioni di taglio. Esso si può scegliere a piacimento tra quello ad alta o a bassa pressione effettuato con il liquido dielettrico che, in genere, è acqua demineralizzata perché il processo necessita di un dielettrico avente conducibilità e viscosità molto basse; infatti dovendo circondare il filo per la lunghezza del taglio, deve poter penetrare nei piccoli interstizi della zona di lavoro e ricostituire nel più breve tempo possibile le condizioni migliori di pulizia e di isolamento della scarica. Il lavaggio può essere fatto a getto, mediante ugelli, o ad immersione. Spesso è a getto nella fase di sgrossatura, in modo da favorire la

migliore eliminazione dei detriti, e a immersione in quella di finitura. Per realizzare la miglior condizione possibile di lavaggio è necessario posizionare l'ugello superiore aderente al pezzo, avendo cura di regolare la pressione e la direzione del flusso in modo da non far deviare o vibrare il filo. Se infatti la pressione è eccessiva, si possono generare dei gorgi o delle turbolenze nocivi all'equilibrio meccanico ed elettrico del filo. Combinando il lavaggio a pressione con l'aspirazione, si ottiene un ulteriore miglioramento delle prestazioni. Il risultato ottimale si raggiunge facendo aderire gli ugelli di lavaggio al pezzo in modo che seguano, nel movimento di taglio, tutta la fessura prodotta dal filo.

3.3.3 Tensione meccanica del filo

Il filo, durante la lavorazione, è influenzato da un certo numero di forze. Queste possono essere divise in due gruppi e cioè quelle che attirano il filo contro il pezzo e quello che lo respingono. L'ideale è realizzare le condizioni affinché il filo sia perfettamente in equilibrio. La tensione meccanica da applicare al filo deve essere tale da permettere uno svolgimento stabile del filo e assicurare sempre la verticalità o la direzionalità in caso di tagli obliqui. Il valore indicativo della tensione meccanica del filo è compreso tra 1 e 1,6 kg. È ovvio che quanto è maggiore la tensione meccanica, tanto più preciso sarà il taglio prodotto, purché la tensione si mantenga entro i limiti di rottura del filo.

CAPITOLO 4

Microelettroerosione

La tecnologia di asportazione del materiale per microelettroerosione è abbastanza simile, riguardo i principi, alle lavorazioni per elettroerosione tradizionali: è un processo termico che sfrutta le scariche elettriche per erodere i materiali conduttori, ha una elevata accuratezza nella lavorazione delle cavità degli stampi, permette di produrre micro componenti con dimensioni minime che arrivano fino a 10 μm , esercita forze trascurabili su tutta la superficie del pezzo da lavorare e dell'elettrodo non essendovi contatto tra di loro..

4.1 Principi fisico-chimici

La microelettroerosione si basa sulla teoria che, quando due elettrodi sono separati da un liquido dielettrico, e si avvicinano a vicenda, il mezzo dielettrico che inizialmente non è conduttore lo diventa temporaneamente ^[3]. Durante questo intervallo saranno generate delle scintille tra gli elettrodi e l'energia termica rilasciata sarà usata per rimuovere il materiale tramite fusione ed evaporazione. Per controllare precisamente l'energia rilasciata è possibile modificare le più piccole caratteristiche dei materiali conduttori. Nello spazio tra elettrodo e pezzo da lavorare, riempito di un mezzo isolante, preferibilmente oli minerali o acqua deionizzata, si verifica la scarica dell'arco elettrico. La presenza del dielettrico serve per evitare effetti elettrolitici sull'elettrodo durante la lavorazione. La cavità realizzata sul pezzo ha una forma che è complementare a quella dell'utensile e il liquido isolante viene scelto per minimizzare la distanza elettrodo-pezzo in modo da ottenere una lavorazione più precisa. Per essere sicuri che il processo sia sicuro però è necessaria una certa larghezza del gap per evitare un cortocircuito, specialmente per gli elettrodi più sensibili alle vibrazioni o alle deformazioni. Inizialmente è necessario un'elevata tensione della corrente per permettere di rompere l'isolamento dovuto al dielettrico generando così un arco elettrico molto intenso. Dato che il metallo rimosso per singola scarica è molto piccolo le scariche avvengono ad alte frequenze, nell'ordine delle decine o centinaia di KHz. La scarica si verifica in una particolare posizione dove il riscaldamento porta a fusione una porzione del pezzo e anche, in piccola parte, dell'elettrodo. Si forma quindi un piccolo cratere sia sull'utensile che sulla superficie del pezzo lavorato. Il materiale rimosso viene raffreddato e risolidificato nel liquido formando molte centinaia di detriti che saranno portati via dal flusso del fluido. Alla fine della durata della scarica, la temperatura del plasma (gas ionizzato ed elettricamente conduttivo ad alta

temperatura) e della superficie dell'elettrodo scende rapidamente ritornando ad avere condizione di isolamento dovuta alla presenza del dielettrico. Per avere condizioni di lavoro stabili è importante lasciare il giusto tempo per il recupero delle proprietà del mezzo dielettrico tra una scarica e l'altra (off-time). Questo perché altrimenti si rischierebbe una scarsa mobilità della scarica che diminuirebbe la precisione e la capacità di controllo della lavorazione. È importante dunque che il fluido dielettrico svolga anche il ruolo di pulizia della superficie, per non rischiare di avere erosione non uniforme sulla stessa a causa di accumuli localizzati di detriti.

4.2 Metodo dell'usura uniforme (UWM)

Il metodo dell'usura uniforme (uniform wear method) è un processo di lavorazione che impegnando il materiale da asportare strato dopo strato con un elettrodo utensile di forma semplice, ad esempio uno a sezione cilindrica o quadrata, consente di controllare e compensare l'usura dello stesso modificandone la traiettoria ^[4]. Il metodo si basa sul fenomeno che, sotto certe condizioni, la variazione della forma della zona dell'utensile soggetta ad usura, dopo un transitorio iniziale, si stabilizza e di conseguenza può essere considerata costante e nota.

4.2.1 Progettazione della profondità di taglio

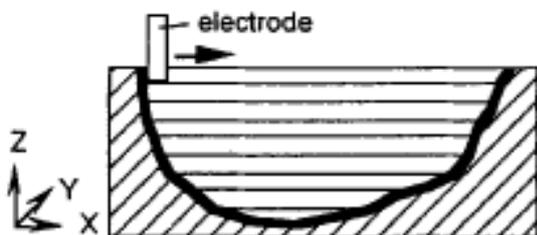


Figura 4: Avanzamento elettrodo lungo vari strati
Fonte: [4]

Ogni lato è lavorato orizzontalmente. Quando l'elettrodo avanza scendendo di un'altezza ΔZ e l'area della sezione è sufficientemente piccola, la deformazione sulla punta dell'elettrodo scompare dopo la lavorazione dello strato perché la sezione deformata è completamente usurata e la punta diventa piatta ancora.

Poiché il valore della planarità del fondo dello strato lavorato è intorno a ΔZ , ΔZ deve essere fissato il più piccolo possibile. Tuttavia il rendimento deve tener conto che un ΔZ piccolo implica una bassa produttività.

4.2.2 Percorso orizzontale dell'elettrodo

Presentiamo ora il percorso dell'elettrodo nel piano X-Y. Nel punto d'inizio l'elettrodo è immerso nel pezzo fino a raggiungere ΔZ , da lì segue il cammino prefissato. Quando arriva nel punto di fine, la superficie lavorata pende dal punto d'inizio a quello finale perché l'elettrodo si è accorciato a causa dell'usura. Per compensare questa inclinazione l'utensile segue il percorso inverso lavorando la superficie in modo da

ottenere la precisione voluta. Ciò è chiamato scansione avanti e indietro (to-and-fro scanning).

Con l'obiettivo di diminuire l'influenza dei bordi arrotondati dell'elettrodo sulla superficie di lavorazione, la distanza tra due linee vicine si trova a meno della dimensione della sezione trasversale dello stesso. La parte interna e il contorno dell'area lavorata sono esaminati alternativamente. Quando il contorno è lavorato, i bordi della punta dell'utensile si arrotondano a causa dell'usura. Tuttavia, quando la parte interna viene trattata, la scarica si verifica uniformemente lungo la parte inferiore dell'elettrodo. Questo ripristina la forma finale originale e riappare l'angolo acuto prima della successiva ripartenza.

4.2.3 Compensazione dell'usura

La compensazione dell'usura longitudinale è necessaria nell'applicazione del metodo quando si lavorano micro cavità. L'equazione per fare ciò la si deriva prendendo come esempio la lavorazione di una cavità verticale. Dopo n strati, l'usura totale dell'elettrodo è espressa da:

$$(n \cdot \Delta Z - n \cdot L_w) S_e = n \cdot L_w \cdot S_w \cdot u \quad \text{quindi} \quad L_w = \Delta Z / (1 + u \cdot S_w / S_e) \quad \text{con}$$

L_w : profondità media lavorata per uno strato

S_e : area trasversale dell'elettrodo (piano X-Y)

S_w : area trasversale della cavità (piano X-Y)

u : usura volumetrica relativa

4.2.4 Riepilogo

Le regole per il metodo dell'usura uniforme possono essere riassunte come segue:

1. Lavorazione dal fondo dell'elettrodo, o lavorazione strato dopo strato con un piccolo elettrodo che avanza su ogni lato;
2. To-and-fro scanning;
3. Sovrapposizione dei percorsi;
4. Lavorazione delle parti interne e dei profili alternativamente.

4.3 Limiti della miniaturizzazione

Con l'aumento della domanda di componenti microscopiche la ricerca nella microelettroerosione ha cominciato a essere sempre più importante ^[5]. Attualmente il diametro più piccolo realizzabile è di pochi micron, quindi ulteriori sforzi dovrebbero

essere fatti per migliorare questo risultato. Per riuscirci bisogna superare i seguenti limiti.

4.3.1 Limiti di dimensione minima lavorabile

I limiti della minima dimensione lavorabile sono stati studiati tramite rettifica per elettroerosione a filo (WEDG) da Kawakami et al. ^[I]. Un asta di carburo di tungsteno cementato dal diametro di 0,3 mm con grani di carburo di tungsteno di 0,4 μm è stata usata come pezzo da lavorare. Il diametro della barra è stato ridotto fino ad ottenere una misura di 2,3 μm . Tramite varie prove si è visto

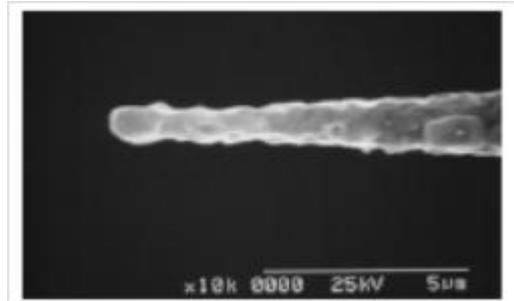


Figura 5: Barra di tungsteno di diametro di 1 μm

Fonte: [6]

che non si può scendere sotto tale valore a causa della rottura del pezzo. Le possibili ragioni di ciò possono essere la grandezza del cratere di scarica, il danneggiamento del substrato superficiale, le tensioni residue e la struttura del materiale del pezzo. Riguardo la grandezza del cratere è stato provato che il più piccolo valore ottenibile al riguardo è 2 μm con polarità positiva del pezzo e usando la minima quantità di energia affinché il processo abbia luogo. Scambiando la polarità ci si è spinti fino a 1 μm .

4.3.2 Effetto delle tensioni residue

Ci sono due tipi di tensioni residue che potrebbero influenzare il limite di miniaturizzazione. Un tipo sono le tensioni già presenti prima della lavorazione, l'altro quelle causate dalla lavorazione stessa.

Le tensioni residue già presenti si possono riscontrare per esempio nelle barre di tungsteno, le quali sono formate mediante deformazione plastica col processo di trafilatura (quindi si producono solitamente per sinterizzazione, proprio per evitare il problema). In questo caso le tensioni in direzione assiale non sono distribuite uniformemente nella direzione radiale.

Dato che l'elettroerosione è un processo termico, le tensioni residue si generano sullo strato risolidificato. Spur et al. ^[III], Kruth et al. ^[III], e Klocke et al. ^[IV] hanno dimostrato che le parti tagliate tramite elettroerosione a filo possono infatti piegarsi quando lo spessore raggiunge grandezze inferiori a 0,1 mm causando notevoli disagi.

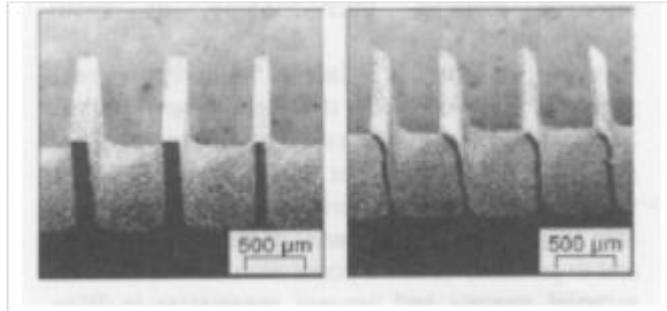


Figura 6: Deviazione di alcuni denti dovuta all'effetto delle tensioni residue

Fonte: [6]

4.3.3 Influenza della struttura del materiale

La grandezza dei grani modificano il comportamento dei materiali e in questo caso la possibilità di miniaturizzare. Effettuando esperimenti sul carburo di tungsteno cementato sopra citato Kawakami et al. [1] hanno notato come usando grani di carburo di tungsteno maggiori di 4 µm il diametro minimo lavorabile è salito a 3 µm, peggiorando quindi la possibilità di rimpicciolimento.

Esaminando l'anisotropia dei materiali Kawakami et al. [1] hanno trovato che questa influisce sulla velocità di lavorazione, infatti dipende significativamente dalla direzione in cui si lavora. La velocità inoltre è notevolmente più alta quando la perforazione viene eseguita perpendicolarmente ai piani. Questo fatto dimostra che l'elettroerosione non è solo un processo termico.

4.4 Sviluppi recenti nella microelettroerosione

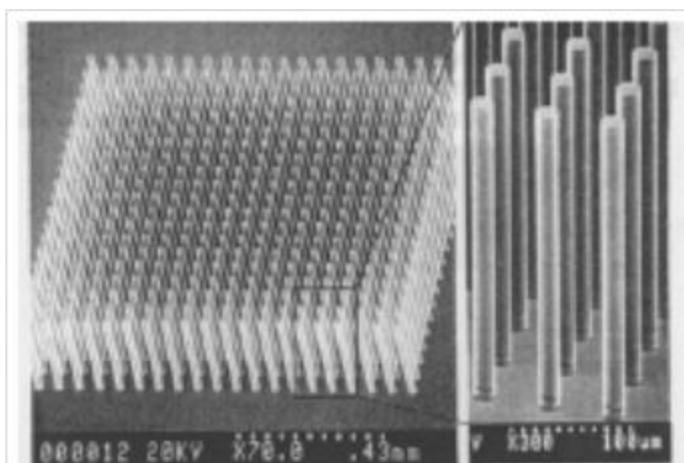


Figura 7: Elettrodi fabbricati con tecnologia LIGA

Fonte: [6]

L'uso di un singolo elettrodo ha dei limiti riguardo la precisione del materiale in lavorazione a causa degli errori dei posizionamento e dell'usura [6].

Così sono stati costruiti tramite tecnologia LIGA [V, VI] dei raggruppamenti di elettrodi dall'alto rapporto altezza-larghezza. (LIGA è un acronimo formato dalle iniziali di tre parole tedesche che individuano i tre

stadi di produzione: LIGA = Lithographie + Galvanoformung + Abformung, che in italiano significano: Litografia + Galvanoplastica + Stampaggio). Un insieme di 400 elettrodi in rame con diametro di 20 μm sono stati fabbricati con questo processo e usati per lavorare dei fori passanti in un pezzo di acciaio inossidabile spesso 50 μm . La lavorazione è durata circa 5 minuti, ovvero 600 volte meno rispetto al tempo che sarebbe stato necessario con un singolo elettrodo. Possono essere costruiti elettrodi di qualsiasi sezione.

Un altro approccio nuovo per aumentare il materiale in lavorazione in microelettroerosione è il seguente ^[VIII]. Per prima cosa ($n=1$) si lavora un micro elettrodo cilindrico tramite elettroerosione a filo. Poi ($n=2$) un elettrodo piatto è perforato per ottenere un modello di fori usando l'elettrodo costruito precedentemente. Come terzo passo ($n=3$) usando quest'ultimo elettrodo lo si riproduce su un blocco da lavorare. Infine ($n=4$) questo blocco lo si usa per creare modelli di fori in modo preciso ed efficiente. I punti 3 e 4 possono essere ripetuti per ottenere un gran numero di fessure.

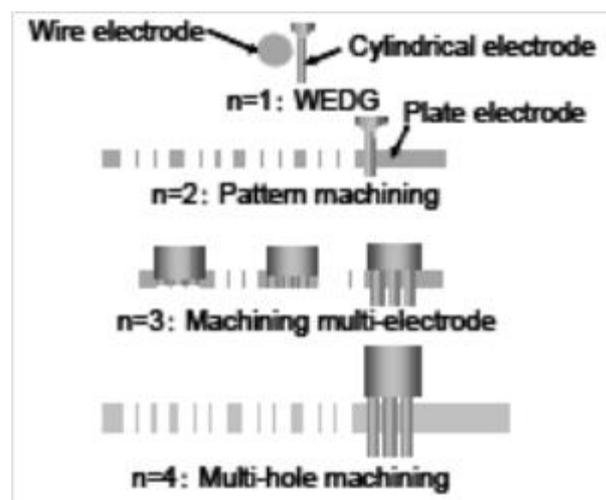


Figura 8: Metodo della microelettroerosione n-esima
Fonte: [6]

Yamazaki et al. ^[VIII] hanno sviluppato un metodo per lavorare contemporaneamente micro aste e fori. Si decide di avere l'elettrodo (l'asta) con polarità positiva, che è l'opposto rispetto alla normale microelettroerosione, e questo ruotando avanza nella piastra di materiale rimuovendo un tasso dieci volte superiore al normale. Siccome l'usura nella regione esterna è molto maggiore rispetto al centro, il fondo dell'elettrodo si affila in pochi minuti. Allo stesso tempo si è formato un micro foro affusolato nel pezzo che è complementare alla forma dell'elettrodo. In questo modo possono essere lavorati

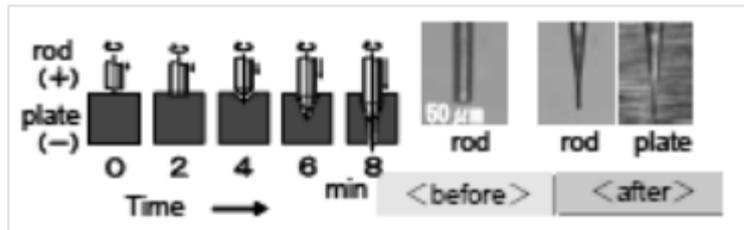


Figura 9: Lavorazione simultanea di elettrodo e foro

Fonte: [6]

contemporaneamente in un singolo processo senza controllo della posizione in direzione radiale.

Un'ultima nuova e semplice idea proposta da Yamazaki et al. ^[IX] permette di lavorare micro mandrini e micro fori senza utilizzare particolari attrezzature come l'elettroerosione a filo. L'elettrodo (il mandrino), avente polarità negativa, ruota e avanza dentro un pezzo creando un buco. Arrivati alla profondità desiderata viene riportato alla posizione iniziale e quindi lo si sposta a una certa distanza dal centro della rotazione. Dopodiché si inverte la polarità e lo si cala nuovamente dentro la cavità con o senza rotazione. Non è importante il posizionamento perché il foro appena creato è utilizzato come utensile sul mandrino.

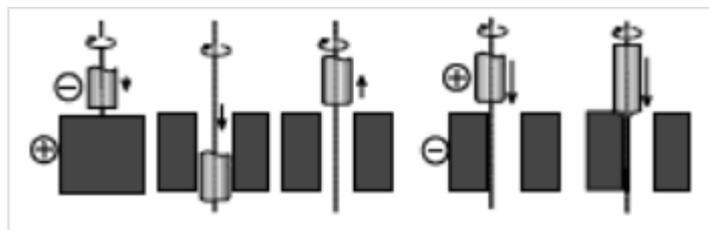


Figura 10: Auto affilamento del mandrino

Fonte: [6]

CAPITOLO 5

Altre varianti del processo

Vengono ora presentati vari metodi di lavorazione per elettroerosione che sono varianti di ciò che è stato illustrato finora ^[7]. Gli obiettivi comuni di queste soluzioni sono: aumentare le prestazioni della lavorazione, avere un prodotto migliore, sviluppare tecniche per lavorare nuovi materiali e trovare migliori condizioni di lavoro.

5.1 Lavorazione assistita da vibrazione ultrasonica

Gli ultrasuoni sono delle onde meccaniche sonore le cui frequenze sono superiori a quelle mediamente udibili da un orecchio umano, di solito 20 kHz. L'uso delle vibrazioni causate dagli ultrasuoni ha permesso di aumentare la circolazione del liquido dielettrico consentendo così una migliore rimozione dei detriti e la creazione di una grande variazione di pressione tra elettrodo e pezzo così da innalzare l'emissione di metallo fuso dalla superficie di quest'ultimo ^[8]. Le lavorazioni con vibrazioni sono adatte per produrre fori profondi e stretti. Il rame è il materiale scelto più frequentemente come utensile, poiché consente di ottenere un processo stabile anche in queste condizioni. L'intervallo delle frequenze usate varia tra 17 a 25 kHz.

5.1.1 Lavorazione di microfori

È stata sviluppata una tecnica di lavorazione tramite elettroerosione con vibrazioni ultrasoniche da Zhixin et al. ^[9] per produrre fori su materiali ceramici dopati con particelle di materiale conduttore. Ciò è efficace per ottenere un alto tasso di rimozione del materiale. Ogawa et al. ^[10] hanno dimostrato che tramite questa tecnica si possono ottenere microfori circa due volte più profondi rispetto alle lavorazioni senza vibrazioni. Thoe et al. ^[11] studiarono dei materiali ceramici rivestiti da una lega di nickel e trovarono che effettuando un foro di 1 mm di diametro usando vari materiali come utensili (tungsteno, acciaio argentato, acciaio al carbonio e rame) con carburo di boro come impasto abrasivo, l'acciaio al carbonio si dimostrava elastico mentre gli altri materiali presentavano fratture dovute alla fatica e deformazione. Usando gli ultrasuoni il tasso di rimozione aumentava sensibilmente. Questo metodo può anche essere adottato per la microelettroerosione: Wangseng et al. ^[12] prendendo Ti-6Al-4V (lega a base di titanio il cui contenuto di alluminio e vanadio è rispettivamente compreso tra 5,5-6,75% e 3,5-5%) come pezzo da lavorare di 32 mm di spessore, carburo YG6X come elettrodo, 20 kHz di frequenza e 2 μm di ampiezza, ottennero fori con rapporto profondità/diametro maggiore di 15. Infine adottando un metodo di lavorazione che combina microelettroerosione e micro lavorazione con ultrasuoni per fabbricare fori in

Nitinol (Nichel titanium naval ordinance laboratory) Huang et al. ^[XV] aumentarono l'efficienza di circa 60 volte senza incrementare eccessivamente l'usura dell'elettrodo.

5.1.2 Vibrazione del pezzo da lavorare

Facendo vibrare il pezzo durante la lavorazione Egashira e Masuzawa ^[XVI] sono riusciti a ottenere microfori piccoli 5 μm in vetro al quarzo e silicio. Si è però riscontrato un problema di elevata usura dell'elettrodo che è stato risolto impiegando un utensile in diamante sintetizzato. Lavorando un acciaio inossidabile di spessore pari a 0,5 mm con un elettrodo in tungsteno di diametro di 43 μm Gao e Liu ^[XVII] hanno trovato che l'efficienza della tecnica è superiore di circa otto volte alla normale elettroerosione. Doveroso sottolineare che la vibrazione fa aumentare il calore del pezzo. Ciò è stato sfruttato da Prihandana et al. ^[XVIII], che combinando un'elevata ampiezza con un'elevata frequenza hanno aumentato MRR.

5.1.3 Elettroerosione a filo

Guo et al. ^[XIX] hanno combinato l'elettroerosione a filo con le vibrazioni da ultrasuoni sul filo stesso per facilitare la formazione di canali di scarica multipli, aumentare il rapporto di utilizzazione dell'energia che porta a migliorare il tasso di taglio e la finitura superficiale. L'alta frequenza delle vibrazioni aumenta la concentrazione delle scariche e riduce la probabilità che il filo giunga a rottura. L'efficienza quindi può essere migliorata fino al 30% e la rugosità della superficie ridotta da 1,95 R_a a 1,7 R_a .

5.2 Lavorazione a secco

Nelle lavorazioni a secco l'elettrodo è formato da un tubo a pareti sottili e l'aria o il gas ad alta pressione è fornito attraverso la condotta. Il ruolo del gas è rimuovere i detriti all'interfaccia utensile-pezzo e raffreddare la superficie. Questa tecnica è stata sviluppata da Kunieda et al. ^[XX, XXI] per diminuire l'inquinamento causato dall'uso del liquido dielettrico il quale produce vapori durante la lavorazione e comporta un costo per smaltire gli scarti. È caratterizzata da:

- Attrito trascurabile per qualsiasi durata dell'impulso.

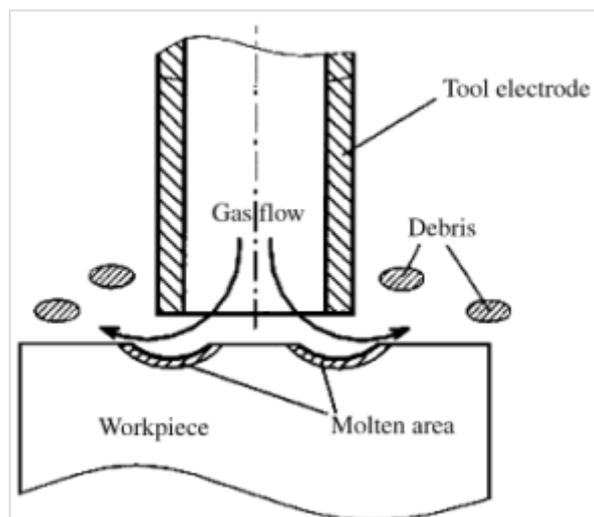


Figura 11: Principi dell'elettroerosione a secco
Fonte: [7]

- Possibilità di cambiare fornitura di gas a seconda delle diverse applicazioni.
- Forze di reazione molto più piccole rispetto a elettroerosione convenzionale.
- Le tensioni residue sono piccole dato che lo strato risolidificato è sottile.
- Il gap è più stretto rispetto alla normale lavorazione.
- La macchina può essere costruita compatta perché non serve un serbatoio per il fluido e un sistema di circolazione per lo stesso.

5.2.1 MRR e usura dell'utensile

MRR può essere aumentato usando come gas l'ossigeno, come scoperto da Kunieda et al. ^[XXI]. La capacità di asportazione cresce infatti al grazie maggior volume del cratere di scarica e a una maggiore frequenza della scarica stessa. L'usura invece è quasi trascurabile per qualsiasi durata dell'impulso, perché il materiale fuso del pezzo che rimane attaccato all'utensile lo protegge. Dall'osservazione della sezione trasversale della superficie di un minuscolo elettrodo, Yoshida e Kunieda ^[XXII] hanno trovato che l'utensile era usurato di una profondità di 2 μm dovuta alla fase iniziale in cui la superficie non era ancora ricoperta da uno strato di metallo. ZhanBo et al. ^[XXV] studiarono la praticabilità dell'elettroerosione a secco per lavorare superfici tridimensionali per capire l'influenza della profondità di passata, della pressione del gas, della durata e intervallo dell'impulso, della velocità di rotazione. I risultati mostrarono che la miglior combinazione tra profondità di taglio e pressione quando la durata dell'impulso è 25 μs porta al massimo il tasso di rimozione del materiale e al minimo l'usura dell'utensile. Quando la velocità di rotazione aumenta, l'usura aumenta di conseguenza ma moderatamente.

5.2.2 Miglioramenti della tecnica

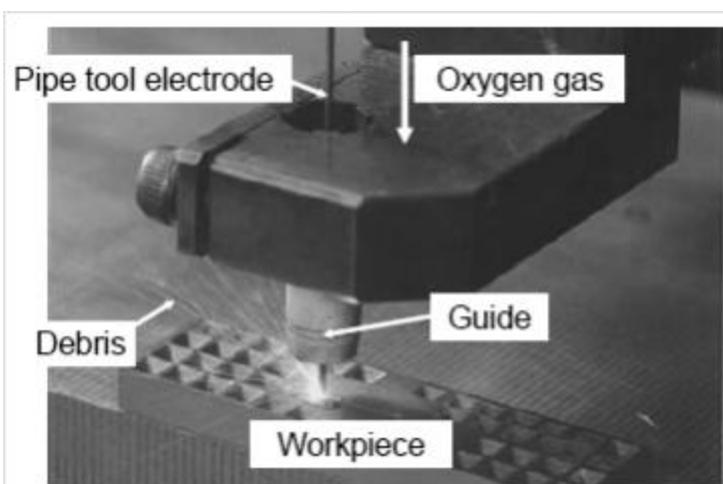


Figura 12: Fresatura per elettroerosione a secco
Fonte: [6]

Elettroerosione a secco con vibrazioni ad ultrasuoni. Zhang et al. ^[XXV] Aumentando la tensione e l'ampiezza della durata dell'impulso degli ultrasuoni, ma diminuendo lo spessore della parete del tubo che funge da elettrodo riuscirono ad aumentare MRR. Inoltre l'uso di ossigeno al posto di aria migliora ancora questo

parametro.

Fresatura per elettroerosione a secco (Kunieda et al. ^[XX]). MRR aumenta quando la densità della potenza di scarica sulla superficie lavorata supera una certa soglia dovuta alla reazione chimica attivata termicamente tra il gas e il pezzo in lavorazione. MRR ottenuto è quasi uguale a quello della fresatura ad alta velocità di acciai temprati.

Attuatori piezoelettrici. Kunieda et al. ^[XXVI] usarono attuatori piezoelettrici per aiutare a controllare la larghezza del gap. Ricordiamo come la piezoelettricità sia la proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando sono soggetti ad una deformazione meccanica.

Elettroerosione a filo. Con questo processo si sono trovate da Furudate e Kunieda ^[XXVII] forze di repulsione trascurabili, scarsa vibrazione del filo, assenza di corrosione del pezzo e gap tra pezzo e filo più stretta rispetto alla normale lavorazione. Ciò è sfruttato per realizzare superfici con un alto livello di accuratezza e per aumentarne la rettilineità. Da notare la presenza di alcuni svantaggi evidenziati da Kunieda e Furudate ^[XXVIII], tra cui un più basso MRR e la presenza di striature sulla superfici dei pezzi tagliati ad alta precisione.

5.3 Elettroerosione su materiali non conduttori

Si crede che solo i materiali conduttori possano essere lavorati per elettroerosione. Il diamante tuttavia può essere manipolato fornendolo di un rivestimento di grafite ottenuto tramite riscaldamento dello stesso a fiamma non ossidante o in ambiente pirolitico. (La pirolisi è l'applicazione di calore in condizioni di assenza di agente ossidante che permette la decomposizione termochimica di materiali organici). Quando avviene la scarica tra l'elettrodo e lo strato di grafite la temperatura nel punto di scarica cresce fin sopra la temperatura di conversione diamante-grafite e il fondo del cratere è rivestito di grafite formata al momento. In seguito il processo viene ripetuto ^[XXIX, XXX].

Fukuzawa et al. ^[XXXI, XXXII, XXXIII] hanno trovato un metodo per lavorare materiali ceramici: si pone su di essi una maglia o un piatto metallico e la scarica avviene tra questo e l'elettrodo. Mentre il metallo viene eroso, l'olio di lavoro viene decomposto termicamente e carbonio pirolitico si depone sulla superficie del pezzo la cui polarità è positiva. Dopo questo passaggio la superficie del materiale ceramico è quindi ricoperta di uno strato di carbonio che è elettricamente conduttivo. Perciò le scariche continuano a verificarsi sulla superficie finché la deposizione del carbonio è mantenuta.

5.4 Effetto delle particelle conduttive nello sparking gap

La polvere abrasiva sottile è mischiata con il liquido dielettrico per ottenere un processo che funziona costantemente a bassi impulsi di energia e che mostra un aumento delle prestazioni rispetto alla normale elettroerosione. La polvere elettricamente conduttiva riduce la forza isolante del fluido e aumenta il divario per la scintilla tra il pezzo e l'elettrodo. Lo scopo di tutto ciò è rendere il processo più stabile e migliorare l'efficienza, il tasso di rimozione del materiale e la qualità della superficie.

5.4.1 Qualità superficiale

Ming et al. ^[XXXV] indicarono che alcune polveri conduttive e agenti lipolitici (che sono solubili in sostanze oleose) possono abbassare la rugosità superficiale e la tendenza a fratturarsi del pezzo durante la finitura. È importante avere la corretta combinazione di polvere e materiale da lavorare per ottenere la qualità voluta. A tal proposito Wong et al. ^[XXXV] hanno condotto esperimenti usando grafite, silicio, alluminio, vetro schiacciato, carburo di silicio e solfuro di molibdeno con differenti grandezze dei grani. La polvere di alluminio ad esempio permette di ottenere una superficie a specchio lavorando l'acciaio speciale SKH-51, ma non altrettanto con lo SKH-54. Nell'ambito delle indagini di questa tecnica Yan et al. ^[XXXVI] hanno scoperto, ad esempio, che la superficie dell'acciaio da utensili SKD-61 si rivela resistente a corrosione e con aumentata durezza se una corretta quantità di polvere viene aggiunta al dielettrico. Come polvere si è studiata molto quella di silicio da Pecas ed Henriques ^[XXXVII] per valutare l'incremento degli indicatori della qualità superficiale e il tempo di gestione del processo. I risultati mostrano che una concentrazione di silicio pari a 2 g/l permette di raggiungere crateri lisci e molto riflettenti con una rugosità media che dipende dalla zona dell'elettrodo e varia da 0,09 μm per 1 cm^2 a 0,57 μm per 64 cm^2 . Il tempo di lucidatura inoltre ha un enorme effetto sulla diminuzione della rugosità superficiale.

5.4.2 Material removal rate

Sono stati fatti diverse prove per cercare di capire quali sostanze portano dei vantaggi. Jeswani ^[XXXVIII] ha aggiunto circa 4 g/l di raffinata polvere di grafite nel cherosene trovando così che MRR aumenta del 60 % e l'usura dell'utensile del 15%. Oppure aggiungere polvere elettricamente conduttiva come quella di alluminio (come fatto da Yan e Chen ^[XXXIX]) può ampliare la distanza tra elettrodo e pezzo, migliorare la dispersione di energia, la rugosità superficiale e il tasso di rimozione del materiale. Zhao et al. ^[XL] usarono sabbia di alluminio con una concentrazione di 40 g/l e 10 μm di dimensione del grano che portò ad un miglioramento dell'efficienza della lavorazione da 2,06 a 3,4 mm^3/min con un incremento del 70%. Inoltre l'efficienza può essere

largamente aumentata scegliendo parametri di scarica appropriati (picco della corrente o larghezza dell'impulso). Il più alto MRR è stato ottenuto col cromo avente una dimensione del grano di 70-80 nm, da Tzeng e Lee ^[XL1].

5.4.3 Strato risolidificato

L'influenza delle particelle di polvere nella microelettroerosione, specialmente sul gap e sulla diffusività termica sono state studiate da Klocke et al. ^[XL11] sulla lega 718 (Inconel 718) che è una lega nickel-ferro-cromo contenente niobio e molibdeno. Furono aggiunti al fluido dielettrico alluminio e silicio, rispettivamente in 2 e 10 g/l. Il risultato fu un più alto MRR e una zona di bordo più sottile. Aggiungendo tensioattivi (sostanze che hanno la proprietà di abbassare la tensione superficiale di un liquido) con l'alluminio si ottiene un effetto di distribuzione della energia di scarica al fine di ottenere un più sottile strato risolidificato, circa 1-2 μm di spessore rispetto ai 5-8 μm se fosse dielettrico puro.

CAPITOLO 6

Tecniche innovative

Nel presente capitolo vengono presentate due ricerche recenti svolte da studiosi di varie parti del mondo, a dimostrare come l'elettroerosione sia in continua evoluzione, ampliandone i campi di applicazione.

6.1 Modifica della superficie di stampi in acciaio mediante uso di polvere di tungsteno mescolata al fluido dielettrico

Illustriamo ora la modificazione della superficie di tre tipi di stampi in acciaio tramite un metodo che implica polvere di tungsteno sospesa nel mezzo dielettrico ^[8]. Il tungsteno è stato scelto perché è uno degli elementi più importanti nelle leghe di cui solitamente sono fatti gli stampi. Si sono considerati tre parametri fondamentali della lavorazione: il picco di corrente (I_p), l'impulso on-time (P_{on}) e l'impulso off-time (P_{off}). Durante tutta la prova si è tenuta polarità negativa dell'elettrodo e cherosene come fluido dielettrico.

6.1.1 Conoscenze pregresse

La maggior parte delle ricerche riguardo l'uso di polvere miscelata al dielettrico si concentrano su alcuni parametri di processo come il tasso di rimozione del materiale (MRR), il tasso di usura dell'utensile (TWR) e la rugosità superficiale. Lo studio dell'impatto di tale metodo sulla modificazione della superficie cominciò solo una decina di anni fa. È necessario mettere in risalto che la portata del dielettrico ha una notevole influenza sulle capacità del processo ^[XXXVII]. Le polveri miscelate infatti possono depositarsi sulla superficie lavorata o in forma libera o come carburo dalla combinazione col carbonio che deriva dalla rottura del dielettrico ^[XL]. La polvere conduttiva ingrandisce la distanza tra elettrodo e pezzo e migliora la finitura superficiale riducendo l'energia di scarica e disperdendo le scariche casualmente su tutta la superficie ^[XLIII]. Lo spessore dello strato risolidificato è più sottile e le microfratture sono ridotte. Di conseguenza aumenta la resistenza a corrosione. Il tipo e la concentrazione della polvere ha un impatto diretto sul pezzo finale lavorato.

6.1.2 Esperimento

Il tungsteno conferisce al pezzo resistenza alla corrosione e maggiore resistenza e forza ad alte temperature. Esso può esistere nell'acciaio sotto diverse forme: può dissolversi nella fase di ferrite o cementite del sistema ferro-carbonio, può essere presente come carbonio indipendente sotto forma di WC, W_2C , ecc. oppure può formare un composto intermetallico col ferro come Fe_3W_2 o Fe_2W ^[XLIV].

L'esperimento per indagare la migrazione del tungsteno sulla superficie del pezzo da lavorare è stata condotta su tre acciai: acciaio OHNS, acciaio D2 e acciaio H13. Questi campioni sono stati preparati usando metodi standard di metallurgia. Le micro strutture sono state osservate usando un microscopio a scansione elettronica (modello JSM-840A). L'acciaio OHNS presenta una fase di cementite sferoidale in una matrice di martensite temprata. La microstruttura dell'acciaio D2 invece presenta grandi macchie di carburi non disciolti nella matrice di martensite. Infine l'ultimo acciaio mostra una struttura simile al primo ma con la cementite sferoidale presente in maggiore quantità e in dimensioni minori.

Element	Composition (wt.%)		
	OHNS die steel	D2 die steel	H13 die steel
Carbon	0.82	1.57	0.44
Silicon	0.18	0.19	1.04
Manganese	0.52	0.07	0.28
Chromium	0.49	12.38	5.39
Tungsten	-	-	-
Vanadium	0.19	0.96	1.13
Molybdenum	0.13	0.76	0.93
Nickel	0.05	0.09	0.19
Iron	Balance	Balance	Balance

Tabella 1: Composizione chimica originale dei materiali lavorati

Fonte: [8]

Prima di effettuare la lavorazione, la micro durezza di ogni materiale è stata misurata in sei posti differenti ed è stato notato un valore medio. Il materiale dell'elettrodo è rame. Il tempo per ogni lavorazione è stato fissato in dieci minuti. Per miscelare la polvere con il dielettrico è stato posto un piccolo serbatoio, fatto da una sottile lamiera di

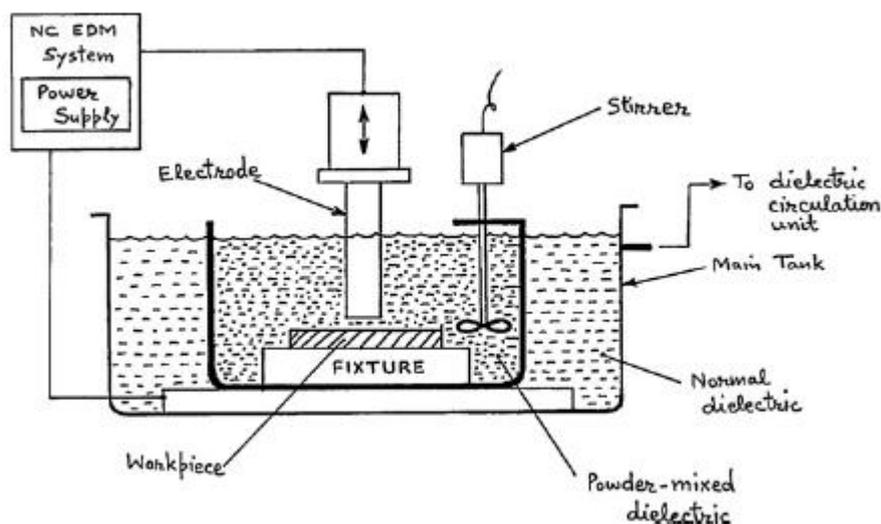


Figura 13: Schema di lavorazione

Fonte: [8]

acciaio dolce, all'interno del serbatoio principale ma isolato dal sistema di filtraggio della macchina. Nel liquido è stato messo un agitatore con lo scopo di distribuire uniformemente la polvere nel dielettrico.

6.1.3 Risultati e discussioni

Tutte le superfici così ottenute sono state testate per controllare la micro durezza tramite un carico di 9,807 N per un tempo di 20 secondi. Questi dati sono poi stati analizzati per trovare la combinazione migliore dei tre parametri considerati. Rispetto alla durezza iniziale tutti e tre gli acciai l'hanno aumentata di più del 100% dopo la lavorazione, con un picco di 130,5% di durezza in più raggiunto dall'acciaio H13. L'analisi con lo spettrometro delle superfici ha messo in risalto un incremento delle percentuali di tungsteno e carbonio. Dalla quantità trascurabile di tungsteno nei tre materiali a inizio esperimento si è misurato un aumento del 2,89% nell'acciaio OHNS, del 2,43% nel D2 e più del 3,25% nel H13. Entro i limiti dell'errore sperimentale si può affermare che l'ammontare di tungsteno trovato è quasi identica rispetto alla composizione chimica originaria.

6.1.3.1 Analisi della superficie

L'acciaio OHSN presenta sulla superficie crateri distinti con caratteristiche vulcaniche e molte goccioline sferiche, le quali indicano che il meccanismo di rimozione del materiale è la fusione e la evaporazione. Il diametro delle goccioline sferiche varia da 5 a 25 μm . Per quanto riguarda l'acciaio D2 si possono riconoscere anche su di esso dei crateri che però sono connessi da micro crepe generatesi durante la lavorazione. Queste favoriscono il distacco di materiale durante la scarica successiva. Infine il terzo materiale mostra un gran numero di detriti formati da particelle irregolari, depositati sulla superficie. Ciò significa che la rimozione di materiale avviene sia per fusione che per evaporazione.

6.1.3.2 Parametri di lavorazione

È stato trovato che la combinazione di valori che permette di raggiungere la durezza massima a fine lavorazione è la stessa per tutti e tre i materiali. Si può quindi dedurre da questi dati che i parametri di processo sono indipendenti dal tipo di materiale che si va a lavorare e questi valori andranno bene per qualsiasi altro. Il contributo più importante lo dà il picco di corrente, che influenza per più del 70% il risultato finale. Un'ultima osservazione è che l'impulso off-time da un contributo maggiore di quello on-time. Questo a significare che è più importante, per avere una buona superficie, il tempo in cui non avviene la scarica e il liquido si riassetta.

6.1.4 Conclusioni

Dall'esperimento svolto possiamo trarre le seguenti conclusioni:

- Sotto appropriate condizioni di lavorazione una certa quantità di materiale può trasferirsi dal dielettrico al pezzo.
- La presenza del carburo di tungsteno aumenta la percentuale di carbonio sulla superficie e ciò indica che ad alte temperature le particelle di polvere reagiscono a formare dei carburi.
- Le migliori condizioni di lavoro sono state trovate in una bassa corrente di scarica (meno di 5 A), un corto impulso on-time (meno di 5 μ s), un lungo impulso off-time (più di 50 μ s) e una polarità dell'elettrodo negativa.
- La superficie di lega trattata con tungsteno e carbonio presenta un aumento della durezza maggiore del 100%, permettendo di affermare che questo metodo può incrementare la vita dello stampo.

6.2 Praticabilità della compensazione dell'usura nella micro elettroerosione basata sul conteggio e la caratterizzazione della popolazione delle scariche

Presentiamo l'applicabilità di un metodo di compensazione reale dell'usura nella fresatura per elettroerosione che prevede il conteggio e la descrizione della popolazione delle scariche elettriche ^[9]. Gli esperimenti eseguiti per permettere ciò hanno coinvolto un gran numero di parametri di processo differenti e molte forme di impulsi di corrente. Il metodo è stato quindi convalidato prendendo atto dell'evidenza sperimentale.

6.2.1 Caratteristiche degli impulsi di scarica nella micro fresatura per elettroerosione

Le prestazioni dei transistor (transfer-resistor, un dispositivo a semiconduttore utilizzato come elemento attivo nei circuiti elettronici) usati nell'elettroerosione non soddisfano del tutto le richieste della micro. Così generatori basati su resistenze e condensatori sono largamente impiegati per la generazione di impulsi. Possono generarne di molto brevi con dei relativamente alti picchi di corrente. Tuttavia è difficile determinare completamente gli effetti dei parametri di processo, come la tensione di accensione e la capacità, sui parametri di scarica come la tensione e la corrente, a causa della natura termica aleatoria dei processi di microelettroerosione. Normalmente gli impulsi hanno una durata da 30 ns a 2 μ s e un picco di corrente da 0,8 A a 18 A con una corrispondente energia di scarica che varia in un intervallo compreso tra 0.01 μ J e 350 μ J. È quindi evidente che la grande variabilità delle caratteristiche degli impulsi è

osservata durante la lavorazione e di conseguenza gli impulsi possono essere descritti completamente solo in termini di distribuzione statistica dell'intera popolazione.

6.2.2 Compensazione dell'usura basata sulla descrizione della popolazione

Come discusso nel precedente paragrafo, anche con impostazioni costanti del processo e una lavorazione stabile, avvengono differenti tipi di scariche. Queste sono caratterizzate da differenti valori del picco di corrente, durata dell'impulso ed energia di scarica. Quindi, con l'obiettivo di implementare una compensazione dell'usura in tempo reale, sarebbe necessario eseguire una discriminazione di tutte le scariche e associare a ognuna il corrispondente tasso di usura e di rimozione del materiale. Tuttavia è ragionevole aspettarsi che, se si è raggiunto un processo stabile, sia stabile anche la popolazione di scariche in modo che se si analizzano un adeguato numero di campioni, questi avranno una distribuzione simile a quella della popolazione e un valore della media e della deviazione standard che è compatibile con i valori dell'impulso della corrente, della durata di quest'impulso e dell'energia di scarica. Inoltre le lavorazioni normalmente si svolgono tramite un gran numero di scariche anche se l'elettrodo ha un diametro piccolo, più di mille scariche sono necessarie per un'usura profonda 1 μm . Basandosi su queste considerazioni possiamo definire la quantità di materiale rimosso per scarica (MRD, material removal per discharge) e l'usura dell'utensile per scarica (TWD, tool wear per discharge). Il processo può essere descritto tramite un determinato numero di campioni che rispettano la distribuzione della popolazione e la compensazione può avvenire con un semplice conteggio delle scariche e un adattamento dell'utensile in base all'usura per singola scarica. Per fare ciò sono richiesti molti esperimenti per descrivere TWD ogni volta che vengono cambiati i parametri di lavorazione. Tuttavia dopo numerose prove si è visto come l'influenza della forma dell'impulso sia trascurabile e ciò che più modifica TWD è l'energia di scarica media.

6.2.3 Sperimentazioni

Sono stati eseguite due esperienze coinvolgendo un gran numero di parametri di processo e differenti forme d'impulso. La prima per descrivere la popolazione delle scariche in termini di caratteristiche dell'impulso (forma dell'impulso della corrente, picco della corrente ed energia) tramite la ripetizione di campioni di varie forme d'onda, la seconda per descrivere la popolazione in termini di TWD. Tutte e due le esperienze sono state svolte con la macchina per micro fresatura per elettroerosione Sarix SX 200 equipaggiata con uno scanner laser micrometrico per la misura dell'usura e del diametro dell'utensile (con una ripetibilità di 0,03 μm). Gli elettrodi usati erano in

carburo di tungsteno con un diametro di 300 μm e il pezzo da lavorare un acciaio martensitico inossidabile modificato AISI 420. Sono state adottate sette forme d'impulso differenti con un'energia di scarica media da 0,24 μJ e 194 μJ .

Pulse type	Peak current [A]	Pulse duration [μs]	Average E [μJ]	STD of average E [μJ]
1	0.79	0.06	0.24	0.05
2	4.92	0.24	11.58	0.28
3	9.60	0.71	64.53	1.15
4	8.38	1.37	108.49	2.77
5	11.41	1.58	168.51	8.25
6	15.84	1.60	194.3	8.40
7	8.16	1.31	98.69	4.73

Tabella 2: Tipi di impulso usati nell'esperimento. Media e deviazione standard riguardano un campione di popolazione che varia da 200 a 400 scariche

Fonte: [9]

6.2.3.1 Descrizione della popolazione

Per le sette impostazioni di energia scelte la popolazione è stata descritta dalla ripetizione di campioni della forma d'onda di corrente e tensione. I segnali sono stati acquisiti utilizzando una sonda di tensione con larghezza di banda di 250 MHz e una sonda di corrente sviluppata in laboratorio. Le sonde sono state connesse a un oscilloscopio digitale con una larghezza di 500 MHz e una frequenza di campionamento in tempo reale di 200 MSa/s. Il livello di innesco del segnale di corrente è stato impostato ad un valore basso in modo da acquisire tutte le scariche. I dati relativi ai campioni osservati sono stati trasferiti nel computer che gli ha processati per estrarre i picchi di corrente e la tensione di scarica per calcolare di ognuna la corrispondente energia. Tracciando l'istogramma della frequenza si è visto che riproducono bene l'intera popolazione, verificando l'ipotesi che si può studiare il campione di scariche per identificare il comportamento di tutta la popolazione.

6.2.3.2 Usura dell'utensile

Per le stesse sette impostazioni di energia è stata eseguita l'esperienza col fine di determinare l'usura per scarica. È stata lavorata una cavità cilindrica con un diametro di 500 μm e una profondità di 100 μm mentre le scariche venivano contate da un contatore digitale (HP 53131 A) con una frequenza fino a 225 MHz. La lunghezza dell'elettrodo è stata misurata usando uno scanner laser micrometrico prima e dopo la lavorazione. Anche il diametro è stato misurato così l'usura volumetrica dell'elettrodo è

stata determinata accuratamente per ogni test. Inoltre per ogni forma d'impulso la prova è stata ripetuta tre volte.

Si è determinato quindi una chiara relazione tra l'energia media di scarica della popolazione e TWD. Questa relazione può essere usata come stima di TWD per i vari parametri di processo come l'energia di scarica media. La compensazione dell'usura in micro fresatura per elettroerosione può essere così ottenuta contando le scariche e moltiplicando il numero di queste con il valore TWD della popolazione. Conoscendo il diametro dell'elettrodo l'usura per scarica può essere determinata e si può effettuare la compensazione con un movimento verso il basso dell'utensile durante la lavorazione. Bisogna prestare attenzione però che un errore iniziale nella stima di TWD produce un incremento dell'errore lungo tutta la durata della lavorazione.

6.2.4 Conclusioni

È stato proposto un nuovo metodo di compensazione dell'usura per la micro fresatura per elettroerosione. Il metodo è basato sul riconoscimento che le scariche possono essere descritte in termini di distribuzione della popolazione piuttosto che individualmente, riuscendo a capire come si comporta la totalità di esse durante la lavorazione. Ciò è utile perché non potendo intervenire sulla singola scarica, sapere l'effetto provocato dall'intera popolazione permette di prevedere e correggere in tempo reale l'andamento dell'elettrodo per ottenere una sempre maggiore linearità tra lavorazione reale e progettazione. La tecnica si affida alla descrizione dell'energia di scarica e dell'usura per scarica. È stato dimostrato la validità di questo approccio che però va associato a un controllo periodico dell'elettrodo per verificare che ciò che ci si aspetta in termini di usura lo è anche realmente. Grazie a questi studi si possono eseguire operazioni di alta precisione e complessità geometrica.

6.3 Osservazioni

In quest'ultima parte del trattato si è voluto evidenziare due esperimenti. La scelta di entrare nel dettaglio di sole due ricerche è stata voluta per illustrare esempi concreti di come si possono effettuare prove che hanno lo scopo di portare a miglioramenti dell'arte e per portare a conoscenza degli ultimi risultati conseguiti, notando che le pubblicazioni sono dell'anno in corso e del precedente. Si è potuto quindi osservare quali parametri influiscono maggiormente su determinate caratteristiche: per ottenere una maggiore durezza superficiale del pezzo, lavorato in una bagno di dielettrico e polvere di tungsteno, bisognerà concentrarsi sul picco di corrente più che sull'impulso on-time e off-time, anche se quest'ultimo è il più incisivo tra i due impulsi; per la finitura superficiale è sempre stato chiaro che meno l'utensile risulterà usurato più sarà

precisa, ma con la caratterizzazione della popolazione si è riusciti a migliorare questo rapporto usura-finitura. Sono stati evidenziati inoltre le caratteristiche strutturali dei materiali studiati e le relative grandezze di lavorazione, tra cui le tempistiche seguite, l'intensità di corrente adottata, le misure scelte.

Possiamo dedurre che i lavori presentati contribuiranno a dare un maggior stimolo alla ricerca futura perché caratteristiche come la durezza e la finitura superficiale sono di fondamentale importanza nelle applicazioni quotidiane e nello sviluppo di materiali con sempre maggiori proprietà. Si riscontrano interessi nel campo medico dove la precisione e la miniaturizzazione sono requisito fondamentale, o nel campo aerospaziale dove si ricercano materiali che resistano a sollecitazioni sempre più estreme, o nell'industria generale dove la qualità risulta essere arma vincente per coprire più ampie fette di mercato. Da sottolineare infine come i miglioramenti ottenuti influiscano abbassando il costo che l'azienda dovrà sostenere per i propri prodotti. Ad esempio riducendo i pezzi scartati, aumentando la produttività e diminuendo problemi post-vendita grazie alla fornitura di prodotti più resistenti e precisi.

CONCLUSIONI

Nell'elaborato presente sono stati descritti vari aspetti della lavorazione per elettroerosione, spiegando il funzionamento di alcune varianti dello stesso processo. I prodotti realizzati sono per la maggior parte matrici e stampi, pezzi dalla forma complessa e utensili da taglio. Tra i vantaggi principali possiamo evidenziare la possibilità di lavorare qualsiasi materiale conduttore indipendentemente dalla sua durezza, la possibilità di modellare pezzi metallici di elevato spessore e consistente volume, la capacità di ottenere tagli di qualsiasi forma geometrica, delle discrete tolleranze dimensionali, il non contatto tra utensile e pezzo che quindi evita sforzi di flessione e infine un'elevata autonomia delle macchine che spesso lavorano ore senza presidio. Tra gli svantaggi invece si ha una produttività inferiore alle lavorazioni per asportazione con utensili da taglio, un certo grado di rugosità per le superfici prodotte e un'elevata usura relativa dell'utensile.

L'aspetto della velocità di lavorazione è limitante ed è un punto da migliorare, ma trascurabile rispetto ai benefici essendo questa tecnologia principalmente operazione di finitura. Per quanto riguarda la rugosità invece abbiamo visto come tramite microelettroerosione si possa diminuire fino a quasi renderla impercettibile. L'usura infine si può controllare in modo che non influisca sulla finitura superficiale.

Una particolare attenzione va data inoltre alla scelta di utilizzare questo processo, in quanto le macchine richiedono un investimento notevole in termini di denaro e l'ammortizzamento possibile della spesa si ottiene se si ha una buona mole di lavoro che sarà possibile eseguire.

L'elettroerosione è molto diffusa in vari settori, tra cui quello aeronautico, industriale (produzione di filtri, pale turbogas, cave su giranti per compressori, anelli diffusori, micro foratura, taglio di materiali complessi), delle telecomunicazioni, dei trasporti, dell'energia e anche in quello medico. Da quanto appreso credo avrà sviluppi futuri in quanto permette di raggiungere standard qualitativi e dimensionali che poche altre lavorazioni possono vantare. Queste caratteristiche di miniaturizzazione e complessità ottenibili fungeranno da traino per ricerche ulteriori, col fattore comune dell'abbattimento dei costi (sempre presente), della diminuzione dell'inquinamento (ormai una necessità) e della volontà di spingersi oltre i limiti per migliorare lo stile di vita attuale.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare “Simpa S.r.l.”, azienda con sede a Marola (Vicenza), che lavora stampi per materie plastiche, la quale ha dato fin da subito la possibilità di visionare i macchinari atti a tale lavorazione dando così un risvolto tangibile alle informazioni raccolte nel presente lavoro.

Ruolo fondamentale è stato ricoperto dal dottorando Gianluca Tristo che presso i laboratori di Rovigo del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell’Università di Padova ha chiarito dubbi e fornito spiegazioni e spunti per completare il lavoro anche grazie a prove pratiche svolte con la macchina per microelettroerosione Sarix Sx 200. Tristo inoltre ha visionato la tesina prima della definitiva stesura, fornendo consigli e punti di vista su come esporre al meglio e correttamente l’argomento.

Bibliografia

- [1] Grimaldi Fortunato, 1995, EDM macchine e sistemi per elettroerosione, Melzo (MI), Tecniche Nuove.
- [2] Kalpakjian Serope, Schmid Steven R., 2008, Tecnologia Meccanica, Tr.it Zibido S. Giacomo (MI), Pearson Prentice Hall.
- [3] Mahendran S., Devarajan R., Nagarajan T., Majdi A., 2010, "A review of Micro-EDM", Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, vol. II.
- [4] Yu Z.Y., Masuzawa T., Fujino M., 1998, "Micro-EDM for Three-Dimensional Cavities – Development of Uniform Wear Method", CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 47, pp. 169-172.
- [5] Kawakami T., Kunieda M., 2005, "Study on Factors Determining Limits of Minimum Machinable Size in Micro EDM", CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 54, pp. 167-170.
- [6] Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K.P., Schumacher B.M., 2005, "Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process", CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 54, pp. 64-87.
- [7] Mohd Abbas N., Solomon D.G., Fuad Bahari Md., 2007, "A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)", International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, pp. 1214-1228.
- [8] Kumar S., Batra U., 2012, "Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric", Journal of Manufacturing Processes, vol. 14, pp. 35-40.
- [9] Bissacco G., Hansen H.N., Tristo G., Valentincic J., 2011, "Feasibility of wear compensation in micro EDM milling based on discharge counting and discharge population characterization", CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 60, pp. 231-234.
- [10] Carra L. et al., 2005, Le garzantine Scienze, Milano (MI), Garzanti.
- [11] Stoppelli P. et al., 2003, Dizionario Italiano, Milano (MI), Garzanti Linguistica.

Altri riferimenti

- [I] Kawakami T., Kunieda M., 2005, "Study on Factors Determining Limits of Minimum Machinable Size in Micro-EDM", *Annals of the CIRP*, vol. 54, pp. 167-170.
- [II] Spur G., Uhlmann E., Doll U., Daus N., 1999, "WEDM of Microstructured Components Parts – Heat Conduction Model", *IJEM*, vol. 4, pp. 41-46.
- [III] Kruth J.P., Bleys P., 2000, "Measuring Residual Stress Caused by Wire EDM of Tool Steel", *IJEM*, vol. 5, pp. 23-28.
- [IV] Kocke F., Lung D., Noethe T., 2001, "Micro Contouring by EDM with Fine Wires", *Proc ISEM 13*, pp. 767-779.
- [V] Masaki T., Kawata K., Masuzawa T., 1990, "Micro Electro-Discharge Machining and Its Applications", *Proc. IEEE MEMS*, pp. 21-26.
- [VI] Takahata K., Gianchandani Y.B., 2001, "Batch Mode Micro-EDM for High-Density and High-Throughput Micromachining", *Proc. 14th IEEE Int'l Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2001)*, pp. 72.75.
- [VII] Masaki T., Wada T., 2002, "Micro Electro Discharge Machining", *J. of JSAT*, vol. 46, pp. 610-613.
- [VIII] Yamazaki M., Mori N., Suzuki T., Kunieda M., 2003, "Simultaneous Processing Method for Micro-Rods and Holes using EDM", *Int'l Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)*, pp. 983-988.
- [IX] Yamazaki M., Suzuki T., Mori N., Kunieda M., 2004, "EDMing of Micro-Rods by Self-Drilled Holes", *J. Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 134-138.
- [X] Guo Z.N., Lee T.C., Yue T.M., Lau W.S., 1997, "A study of ultrasonic-aided wire electrical discharge machining", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 63, pp. 823-828.
- [XI] Zhixin J., Jianhua Z., Xing A., 1995, "Ultrasonic vibration pulse electro-discharge machining of holes in engineering ceramics", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 53, pp. 811-816.
- [XII] Ogawa H., Nogami T., Marimoto I., 1999-2001, "Study of Micro Machining of Metals by EDM with High Frequency Vibration", *Takushima Prefectural Industrial Technology Center*.
- [XIII] Thoe T.H., Aspinwall D.K., Killey N., 1999, "Combined ultrasonic and electrical discharge machining of ceramic coated nickel alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 92-93, pp. 323-328.
- [XIV] Wansheng Z., Zhenlong D., Shichun D., Guanxin C., Hongyu W., 2002, "Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 120, pp. 101-106.

- [XV] Huang H., Zhang H., Zhou L., Zheng H.Y., 2003, "Ultrasonic vibration assisted electro-discharge machining of microholes in Nitinol", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, pp. 693-700.
- [XVI] Egashira K., Masuzawa T., 1999, "Microultrasonic machining by the application of work piece vibration", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 48, pp. 131-134.
- [XVII] Gao C., Liu Z., 2003, "A study of ultrasonically aided micro-electrical-discharge machining by the application of work piece vibration", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 139, pp. 226-228.
- [XVIII] Prihandana G.S., Hamdi M., Wong Y.S., Mitsui K., 2006, "Effect of vibrated electrode in electrical discharge machining", *Proceedings of the First International Conference and Seventh AUN/SEED-Net Fieldwise Seminar on Manufacturing and Material Processing*, pp. 133-138.
- [XIX] Guo Z.N., Lee T.C., Yue T.M., Lau W.S., 1997, "Study on the machining mechanism of WEDM with ultrasonic vibration of the wire", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.69, pp. 212-221.
- [XX] Kunieda M., Miyoshi Y., Takaya T., Nakajima N., Yu Z.B., Yoshida M., 2003, "High Speed 3D Milling by Dry EDM", *Annals of the CIRP*, vol.52, pp. 147-150.
- [XXI] Kunieda M., Takaya T., Nakano S., 2004, "Improvement of Dry EDM Characteristics Using Piezoelectric Actuator", *Annals of the CIRP*, vol. 53, pp. 183-186.
- [XXII] Kunieda M., Furuoya S., Taniguchi N., 1991, "Improvement of EDM efficiency by supplying oxygen gas into gap", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 40, pp. 215-218.
- [XXIII] Yoshida M., Kunieda M., 1999, "Study on mechanism for minute tool electrode wear in dry EDM", *Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for precision Engineering*, vol. 65, pp. 689-693.
- [XXIV] ZhanBo Y., Takahashi J., Nakajima N., Sano S., Karato K., Kunieda M., 2006., "Feasibility of 3-D surface machining by dry EDM", http://www.sodic.co.jp/techimgarticle_s02.pdf.
- [XXV] Zhang Q.H., Zhang J.H., Deng J.X., Qin Y., Niu Z.W., 2002, "Ultrasonic vibration electrical discharge machining in gas", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, pp. 135-138.
- [XXVI] Kunieda M., Takaya T., Nakano S., 2004, "Improvement of dry EDM characteristics using piezoelectric actuator", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 53, pp. 183-186.

- [XXVII] Furudate C., Kunieda M., 2001, "Fundamental study of Dry-WEDM", Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for precision Engineering, vol. 67, pp. 1180-1184.
- [XXVIII] Kunieda M., Furudate C., 2001, "High precision finish cutting by dry WEDM", CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 50, pp. 121-124.
- [XXIX] Aspinwall D.K., Dewes R.C., Lee H.G., Simao J., 2003, "Electrical Discharge Surface Alloying of Ti and Fe Workpiece Materials Using Refractory Powder Compact Electrodes and Cu Wire", Annals of the CIRP, vol. 52, pp. 151-154.
- [XXX] Heerschap M., Levitt C.M., 1960, "Eroding of Hard Crystalline Carbon", United States Patent, vol. 2, pp. 939-941.
- [XXXI] Fukuzawa Y., Katougi H., Mohri N., Furutani K., Tani T., 1998, "Machining Properties of Insulating Ceramics with an Electric Discharge Machine", Proc. ISEM 12, pp. 445-453.
- [XXXII] Mohri N., Fukuzawa Y., Tani T., Sata T., 2002, "Some Considerations to Machining Characteristics of Insulating Ceramics", Annals of the CIRP, vol. 51, pp. 161-164.
- [XXXIII] Tani T., Fukuzawa Y., Mohri N., Saito N., Okada M., 2004, "Machining Phenomena in WEDM of Insulating Ceramics", Journal of Materials Processing Technology, vol.149, pp. 124-128.
- [XXXIV] Yan Ming Q., You He L., 1995, "Powder-suspension dielectric fluid for EDM", Journal of Materials Processing Technology, vol. 52, pp. 44-54.
- [XXXV] Wong Y.S., Lim L.C., Rahuman I., Tee W.M., 1998, "Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric, Journal of Materials Processing Technology, vol. 79, pp. 30-40.
- [XXXVI] Yan B.H., Lin Y.C., Huang F.Y., Wang C.H., 2001, "Surface modification of SKD 61 during EDM with metal powder in the dielectric", Materials Transactions, vol. 42, pp. 2597-2604.
- [XXXVII] Pecas P., Henriques E., 2003, "Influence of silicon powder-mixed dielectric on conventional electrical discharge machining", International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 43, pp. 1465-1471.
- [XXXVIII] Jeswani M.L., 1981, "Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid in electrical discharge machining", Wear, vol. 70, pp. 133-139.
- [XXXIX] Yan B.H., Chen S.L., 1993, " Effects of dielectric with suspended aluminum powder on EDM", Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, vol. 14, pp. 307-312.
- [XL] Zhao W.s., Meng Q.G., Wang Z.L., 2002, "The application of research on powder mixed EDM in rough machining", Journal of Materials Processing Technology, vol. 129, pp. 30-33.

- [XL I] Tzeng Y.F., Lee C.Y., 2001, "Effects of powder characteristics on electrodischarge machining efficiency", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, pp. 586-592.
- [XL II] Klocke F., Lung D., Antonoglou G., Thomaidis D., 2004, "The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining with small discharge energies", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.149, pp. 191-197.
- [XL III] Rehbein W., Schulze H.P., Mecke K., Wollenberg G., Storr M., 2004, "Influence of selected groups of additives on breakdown in EDM sinking", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 149, pp. 58-64.
- [XL IV] Lakhtin Y., 1983, *Engineering physical metallurgy*, Mosca, Mir Publisher.