

A cura di Gualtiero Fantoni e Michele Abruzzo

Manuale delle **tecnologie di lavorazione non convenzionali**

Teoria, modelli e applicazioni industriali



Indice

Gli Autori	XIII
Prefazione	XVII
Introduzione	XIX

Michele Abruzzo, Gualtiero Fantoni

CAPITOLO 1 – Concetti base delle lavorazioni non convenzionali	1
1.1 Introduzione alle lavorazioni non convenzionali	1
1.1.1 Contesto storico e fattori di sviluppo	1
1.1.2 Nuovi materiali e sfide tecniche	2
1.1.3 Lo sviluppo delle lavorazioni non tradizionali	2
1.1.4 Settori trainanti e applicazioni industriali	3
1.2 Le lavorazioni a fasci di energia	3
1.2.1 Classificazione delle lavorazioni a fasci di energia	4
1.3 Parametri fisici coinvolti nei processi di asportazione di materiale	8
1.4 Applicabilità dei nuovi processi	9
1.5 Prestazioni dei nuovi processi	11
1.6 Nozioni di termodinamica elementari	13
1.7 Dipendenza dell'energia specifica di soglia dalle dimensioni del truciolo ...	15
1.8 Cenni sulla stima dell'energia specifica di soglia nelle lavorazioni meccaniche	17
1.9 Analisi della temperatura nelle lavorazioni a fasci di energia	20
1.10 Tasso di asportazione e proprietà fisiche del materiale	21

Gian Lorenzo Merlo

CAPITOLO 2 – L'elettroerosione	23
2.1 Introduzione	23
2.2 Principi fondamentali: fisici ed elettrici	34
2.2.1 Scarica elettrica ed erosione	34
2.2.2 Le scariche in condizioni reali	40
2.2.3 Azione fisica della scarica elettrica	42

2.3	Generatore e circuiti di elettroerosione	45
2.3.1	Circuito a rilassamento	45
2.3.2	Interruttori elettronici	49
2.3.3	Multi spark	52
2.4	Elettroerosione a filo	52
2.4.1	Lavaggio	53
2.4.2	Macchina	54
2.4.3	Aspetti pratici	55
2.4.4	Il Material Removal Rate (MRR)	57
2.4.5	Ulteriori applicazioni	59
2.5	Elettrodi	59
2.5.1	Materiali per gli elettrodi utensile	61
2.5.2	Formatura utensili per stampi	65
2.6	Ruolo del dielettrico nel processo EDM	67
2.6.1	Requisiti e caratteristiche dei fluidi dielettrici	68
2.6.2	Isolamento elettrico	69
2.6.3	Filtri a letto di farina fossile (diatomee)	70
2.6.4	Riduzione della superficie di scarica	72
2.6.5	Raffreddamento	72
2.6.6	Immersione	74
2.6.7	Lavaggio	74
2.6.8	Filtrabilità	78
2.6.9	Ionizzazione	78
2.6.10	Sostanze idonee a essere utilizzate come fluidi dielettrici	79
2.6.11	Criteri di scelta dei fluidi dielettrici	83
2.7	Filtrazione e sistemi filtranti	83
2.7.1	Filtri a labirinto o autopulenti	86
2.7.2	Filtri a carta	88
2.7.3	Dimensionamento dei setti filtranti e dei serbatoi	89
2.7.4	Criteri di valutazione della durata d'esercizio dei fluidi EDM	90
2.8	Condizioni delle superfici trattate	91
2.8.1	Rugosità e sua identificazione	92
2.8.2	Metodi per ridurre la rugosità e lo spessore dello strato risolidificato	94
2.9	Fattori di controllo	96
2.9.1	Tensione di lavoro	96
2.9.2	Polarità	97
2.9.3	Controllo del gap	102
2.9.4	Circolazione, pressione, temperatura	104
2.10	Salute e sicurezza ambientale	107
2.11	Conclusioni	110

Giancarlo Maccarini, Lucio Enrico Zavanella

CAPITOLO 3 – Electron Beam Machining (lavorazioni a cannone elettronico) .	113
3.1 Introduzione	113
3.2 Descrizione della macchina	113
3.2.1 L'emettitore	114
3.2.2 Tavola portapezzo e camera a vuoto	117
3.3 Il meccanismo di asportazione del materiale	119
3.4 Bubble splashing	119
3.5 Effetto del bombardamento di elettroni sul materiale	124
3.6 Lavorazioni eseguibili con l'EBM	126
3.7 Foratura con tecnica EBM	126
3.7.1 Meccanismo di foratura	126
3.7.2 Parametri del processo	128
3.7.3 Risultati sperimentali ottenuti	133
3.7.4 Prestazioni del processo	138
3.7.5 Vantaggi e svantaggi della foratura EBM	139
3.8 Saldatura a fascio di elettroni (o Electron Beam Weld, EBW)	140
3.8.1 Introduzione	140
3.8.2 Meccanismo di penetrazione della saldatura	141
3.8.3 Fattori che influiscono sulla profondità di saldatura	142
3.8.4 L'equipaggiamento	146
3.8.5 Proprietà della zona saldata	149
3.8.6 Vantaggi e svantaggi dell'EBW	151
3.9 Altre applicazioni	152
3.9.1 Operazioni di taglio	153
3.9.2 La litografia	153
3.9.3 Processi reattivi	154
3.9.4 Trattamenti termici per mezzo di fasci di elettroni	155
3.9.5 Electron Beam Vapour Deposition	156
3.9.6 Finitura a specchio	156
3.9.7 Stampa 3D	157

Giancarlo Maccarini, Lucio Enrico Zavanella

CAPITOLO 4 – Ion Beam Machining	159
4.1 Introduzione	159
4.1.1 Emissioni Auger	161
4.2 Caratteristiche della lavorazione	161
4.3 La densità di potenza	162
4.4 La macchina	163
4.4.1 Apparecchiature a fasci di ioni focalizzati	164
4.4.2 Apparecchiature ad alta frequenza	166
4.4.3 Apparecchiature a doccia di elettroni (Ion-Shower)	168
4.5 Il meccanismo della lavorazione	170
4.6 Il fenomeno dello sputtering	172

4.7	Tasso di asportazione e parametri di lavorazione	173
4.7.1	Lo sputtering yield	173
4.7.2	Metodi alternativi allo sputtering yield	181
4.8	Distribuzione dell'energia e distribuzione angolare degli atomi espulsi	184
4.9	Caratteristiche dell'IBM	186
4.10	Applicazioni IBM	186
4.11	Reactive Ion Beam (RIBE)	188
4.12	Difetti riscontrabili sulle superfici lavorate	188
4.13	Altri processi basati sull'IBM	190
4.13.1	Ion Beam Deposition	190
4.13.2	Ion Beam Surface Treatment	192
4.14	Link alle lavorazioni	195

Giancarlo Maccarini, Lucio Enrico Zavanella

CAPITOLO 5 – Plasma Beam Machining		197
5.1	Introduzione	197
5.2	Principio fisico del plasma	198
5.2.1	Lo stato di plasma	199
5.3	L'equipaggiamento e le tipologie di PBM	200
5.3.1	Plasma ad acqua	204
5.3.2	PBM ad aria	205
5.3.3	High Definition Plasma	205
5.3.4	Longlife Oxygen Consumable Technology	207
5.4	Caratteristiche del processo	208
5.4.1	Le temperature di lavoro	208
5.4.2	Il meccanismo di taglio	209
5.5	Considerazioni teoriche	209
5.6	Il tasso di asportazione	211
5.7	Effetti superficiali	212
5.8	Applicazioni	213
5.8.1	Saldatura al plasma	213
5.8.2	Taglio al plasma	213
5.8.3	Tornitura al plasma	214
5.8.4	Altre applicazioni	215
5.9	Link alle applicazioni	216

Giancarlo Maccarini, Lucio Enrico Zavanella

CAPITOLO 6 – Ultrasonic Machining	217
6.1 Introduzione	217
6.2 Principio di funzionamento	217
6.2.1 Trasduttori a magnetostrizione	219
6.2.2 Trasduttori piezoelettrici	221
6.2.3 Toolholder	222
6.2.4 Gli utensili	225

6.2.5	La pasta abrasiva	225
6.2.6	Asportazione materiale	225
6.3	Condizioni di lavoro.	226
6.3.1	Frequenza e ampiezza di vibrazione dell'utensile	226
6.3.2	Le condizioni dell'abrasivo	227
6.3.3	Il materiale lavorato.	228
6.3.4	Le caratteristiche dell'utensile	229
6.4	Aspetti teorici sull'asportazione di materiale.	230
6.4.1	Fattori non previsti dal modello di Kainth.	232
6.5	Aspetti della lavorazione finale	233
6.5.1	Finitura superficiale.	235
6.5.2	Accuratezza della lavorazione.	236
6.6	Le applicazioni.	236
6.6.1	Sistemi di posizionamento.	237
6.6.2	Ultrasonic Assisted Machining (UAM).	238
6.6.3	Rotary Ultrasonic Machining (RUM)	238
6.6.4	Saldatura polimeri	239
6.6.5	Lame a ultrasuoni	241

Michele Abruzzo, Gualtiero Fantoni

CAPITOLO 7 – Friction welding.	243
7.1 Introduzione.	244
7.2 Fondamenti	244
7.3 Metodi di alimentazione.	246
7.4 Le macchine.	247
7.5 Tipologie di moto relativo	249
7.6 Variabili di saldatura	252
7.6.1 Variabili del direct drive friction welding	252
7.6.2 Variabili dell'inertia friction welding	253
7.7 Saldabilità dei materiali	254
7.8 Friction stir welding.	256
7.8.1 Introduzione.	256
7.8.2 Fondamenti	257
7.8.3 Macchine utilizzate	258
7.8.4 Progettazione dell'utensile	259
7.8.5 Parametri di saldatura	261
7.8.6 Regioni di saldatura	262

Michele Abruzzo, Gualtiero Fantoni

CAPITOLO 8 – Electrochemical Machining	265
8.1 Introduzione	265
8.2 L'elettrolisi	266
8.3 L'electroplating (placcatura)	268
8.4 Anodizzazione	269

8.5	Coating	269
8.6	Deburring	270
8.7	Electrochemical Machining	271
8.7.1	La legge di Faraday e l'ECM	271
8.7.2	I principi operativi dell'ECM	274
8.7.3	Potenziale di lavorazione	276
8.7.4	La passivazione	277
8.7.5	Curve di Evans ed effetto della concentrazione	278
8.7.6	Gap di lavorazione	280
8.7.7	Temperatura nel meato	285
8.7.8	Parametri di processo	287
8.8	Le reazioni elettrochimiche: approfondimenti	294
8.8.1	Le leggi di Faraday	295
8.9	Applicazioni dell'ECM	296
8.10	Calcoli e dimostrazioni	299

Massimiliano Annoni

CAPITOLO 9 – Waterjet		301
9.1	Water Jet Machining (WJM)	301
9.1.1	Caratteristiche del processo	301
9.2	La macchina	306
9.2.1	Unità di trattamento e filtrazione dell'acqua	307
9.2.2	La pompa	307
9.2.3	Intensificatore e accumulatore	309
9.2.4	Tubazioni per l'acqua a elevata pressione	310
9.2.5	Testa di taglio e ugelli	310
9.2.6	Vasca di raccolta	313
9.2.7	Sistema di movimentazione	314
9.3	Parametri di processo	314
9.3.1	Rugosità sulle pareti del solco di taglio	316
9.3.2	Profondità di taglio	317
9.3.3	Ampiezza del solco	320
9.3.4	Inclinazione della parete del solco	320
9.4	Vantaggi e svantaggi	322
9.5	Principali applicazioni	325
9.6	Abrasive Water Jet Machining	325
9.6.1	La macchina	325
9.6.2	Parametri di processo	326
9.6.3	Vantaggi e svantaggi	327
9.6.4	Abrasive Flow Machining (AFM)	328

Giuseppe Macoretta

CAPITOLO 10 – Laser Material Processing	329
10.1 Introduzione	329
10.2 Fenomeni quantistici del funzionamento	332
10.2.1 Emissione spontanea	333
10.2.2 Emissione stimolata di radiazioni	334
10.3 Il laser	334
10.4 Modi di funzionamento dei laser	345
10.5 Caratteristiche del laser	348
10.5.1 Distribuzione spaziale dell'intensità del fascio	348
10.5.2 Profilo spaziale del fascio laser	349
10.5.3 Divergenza del fascio	350
10.5.4 Potenza e focalizzazione	351
10.5.5 Polarizzazione	352
10.6 Tipologie di laser	355
10.6.1 Laser a gas	356
10.6.2 Allo stato solido	360
10.6.3 Laser a fibra	362
10.6.4 Laser a diodi	364
10.6.5 Laser a eccimeri	366
10.7 Gli effetti del laser sul materiale lavorato	367
10.7.1 La riflettività	367
10.7.2 L'assorbimento	367
10.7.3 Fusione della superficie	369
10.7.4 Vaporizzazione del materiale	370
10.8 Effetto del laser sulla superficie del pezzo	370
10.8.1 Resistenza a fatica	370
10.8.2 Velocità di taglio e ZTA	370
10.9 Termodinamica dei laser	372
10.9.1 Asportazione di calore nei laser allo stato solido	372
10.9.2 Asportazione di calore da un laser a gas	373
10.10 Modelli di conduzione del calore	374
10.11 Applicazioni dei laser	378
10.11.1 Foratura	379
10.11.2 Taglio	382
10.11.3 Saldatura	386
10.11.4 Altre applicazioni	389

*Giuseppe Macoretta, Carmelo De Maria, Amedeo Bonatti, Irene Chiesa,
Gabriele Fortunato*

CAPITOLO 11 – Accenni alla manifattura additiva	391
11.1 Introduzione	391
11.1.1 Materiali e principi di processo	392
11.1.2 Evoluzioni tecnologiche recenti	393
11.1.3 Ambiti applicativi e vantaggi competitivi	393
11.2 Classificazione delle tecnologie additive	394
11.2.1 Considerazioni sul processo	396

11.3 Fasi del processo di stampa	398
11.3.1 Generazione ed esportazione del modello	399
11.3.2 Generazione dei supporti e delle strutture interne	400
11.3.3 Slicing	402
11.3.4 Percorso e G-code	403
11.3.5 Fase di stampa	405
11.4 Stereolitografia.	406
11.4.1 La macchina.	407
11.4.2 Vantaggi e limiti della stereolitografia.	410
11.5 Fused Deposition Modeling.	410
11.5.1 La macchina.	412
11.5.2 Materiali utilizzati	413
11.5.3 Difetti di stampa.	414
11.6 Tecnologie di Powder Bed Fusion (PBF) e Selective Laser Sintering (SLS)	415
11.6.1 La macchina per laser sintering	417
11.6.2 Meccanismi di adesione dei grani	419
11.6.3 Post-processing	421
11.6.4 Parametri di processo	421
11.6.5 Electron Beam Melting	423
11.7 Direct Energy Deposition.	425
11.8 Binder Jetting – Three-Dimensional Printing (3DP)	426
11.9 Material Jetting – Polyjet e Multijet.	427
Postfazione	429
Considerazioni generali e prospettive	429
Leggi utili e costanti universali	431
Leggi utili.	431
Costanti universali	433
Bibliografia	434
Indice analitico	437

L'elettroerosione

Gian Lorenzo Merlo*

2.1 Introduzione

L'elettroerosione ha permesso di sviluppare sistemi di lavorazione rivoluzionari, rendendo possibile l'esecuzione di geometrie tridimensionali irrealizzabili con gli altri metodi di lavorazione dei metalli. Oggigiorno chi lavora materiali speciali, rari e costosi, chi deve produrre stampi per i settori a elevata tecnologia, quali la miniaturizzazione, l'elettronica, l'aerospaziale, il biomedicale ecc., chi richiede ripetibilità dei risultati esecutivi pressoché assoluta, chi deve lavorare i metalli duri come i carburi (per esempio quello di tungsteno), non può ignorare il processo elettroerosivo. L'elettroerosione ha permesso di vedere sotto un'altra luce molti altri processi produttivi sostituendosi in maniera crescente ai metodi convenzionali di lavorazione dei metalli. Oggi il processo elettroerosivo è adottato anche per la produzione di piccole serie di oggetti particolari, per chi esige maggiore produttività, migliore qualità, cicli produttivi brevi, più semplici, con automazione molto spinta, senza sprechi.

Il processo elettroerosivo o EDM, acronimo dell'inglese Electro Discharge Machining (EDM da qui innanzi), ha conosciuto un livello di sviluppo tecnologico e diffusione elevatissimo a partire dall'inizio degli anni '80, in particolare nel settore della costruzione degli stampi. Oggigiorno, il processo è molto utilizzato anche nel settore automobilistico, elettrodomestici, radio TV, PC, arredamento, biomedicale, e per la produzione di monili in metalli preziosi. Un altro ambito applicativo si è sviluppato a partire dalla fine del secolo scorso, nella produzione e affilatura di utensili

* Gran parte di questo capitolo è tratto dal libro di Gian Lorenzo Merlo, *Processo elettroerosivo e fluidi dielettrici*, Steelfluid 2015, integrato con una serie di studi, fra cui il Keynote del CIRP *Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process* (Kunieda et al., 2005). Alcuni elementi di dettaglio su tecniche particolari a supporto dell'EDM sono stati recuperati dal celebre, anche se non recente, *Elettroerosione: macchine e sistemi alternativi*, Tecniche Nuove (König, 1982).

in PCD (diamante industriale) per la quale viene richiesta l'esecuzione di dettagli, con tolleranze ristrette e disegni geometrici volumetrici difficilmente ottenibili con le macchine utensili tradizionali: ciò è reso possibile con l'EDM.

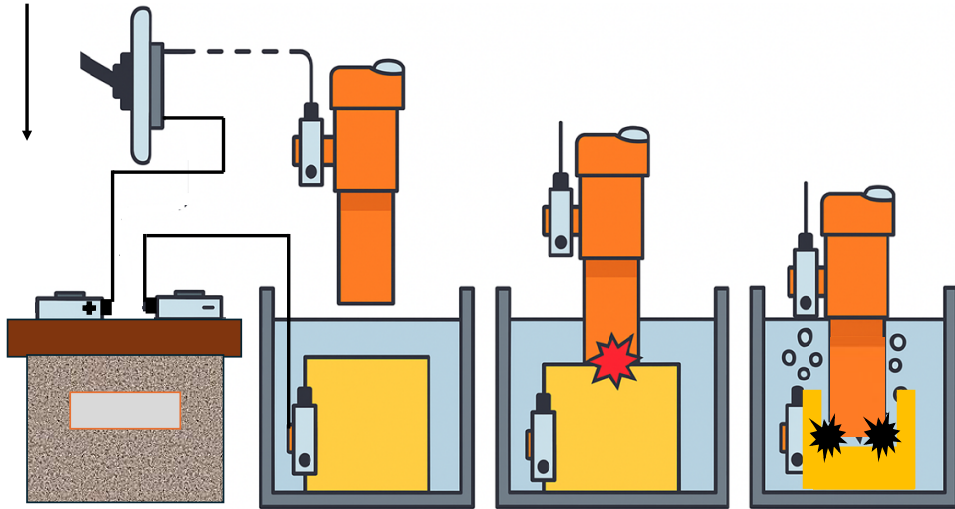


Figura 2.1 – Schema funzionale del processo di EDM a tuffo.

Sebbene l'effetto erosivo-distruttivo delle scariche elettriche sui conduttori metallici fosse noto dal 1770 grazie agli studi di sir F. Priestley, la tecnologia EDM ha iniziato a fare i primi passi nel 1943 per merito dei sovietici B.R. e N.I. Lazarenko; dopo un lungo periodo di studi, prove di laboratorio e perfezionamenti seguiti alle esperienze pratiche di utilizzo, ha raggiunto l'attuale livello di prestazioni. Le prime applicazioni industriali hanno riguardato la rimozione dei maschi (per filettatura di fori) rotti durante la lavorazione. L'elettroerosione permetteva di frantumare il maschio in più parti poi facilmente rimovibili dal foro. L'elettroerosione è un processo di sagomatura in cui una serie di scariche elettriche, controllate e non stazionarie, si innescano tra l'elettrodo utensile e il pezzo in lavorazione (elettrodo pezzo) permettendo l'asportazione del sovrametallo da quest'ultimo. Analogamente ai fulmini in un temporale, in ogni scarica la temperatura sale a elevatissimi livelli lasciando un segno sul terreno che assume la forma di un cratere. In tali condizioni anche i metalli di maggiore durezza e punto di fusione fondono ed evaporano in un turbinio di gas, di particelle metalliche, di ioni ed elettroni. Quando la scarica si esaurisce, sulla superficie colpita rimane appunto un cratere. Se alla scala macroscopica il fenomeno è incontrollato, alla scala microscopica tipica delle scintille dell'elettroerosione, tutto resta sotto controllo.

Electron Beam Machining (lavorazioni a cannone elettronico)

Giancarlo Maccarini, Lucio Enrico Zavanella*

3.1 Introduzione

L'*Electron Beam Machining* (EBM) è un processo di asportazione del materiale basato sull'emissione di un fascio focalizzato di elettroni ad alta velocità. Infatti, gli elettroni possono essere accelerati e raggruppati in uno stretto fascio per mezzo di campi elettrici e magnetici: questi stessi campi determinano le caratteristiche geometriche del fascio, sulla base della lavorazione da eseguire (taglio, foratura, saldatura). La lavorazione EBM è quindi realizzata mediante un flusso di elettroni che, colpendo il pezzo, provoca una rapida fusione e vaporizzazione del materiale. È importante sottolineare che la rimozione del materiale si realizza grazie alla trasformazione dell'energia cinetica degli elettroni in calore. La tecnologia EBM può essere usata per lavorare una grande varietà di materiali (metalli, ceramiche, plastiche): la sua applicabilità non è infatti influenzata da parametri come la durezza, la duttilità e la conducibilità elettrica, termica e il punto di fusione del materiale che si sta lavorando. L'EBM rappresenta la lavorazione che dà le migliori caratteristiche in termini di asportazione del materiale.

3.2 Descrizione della macchina

La macchina per la lavorazione a fascio di elettroni è composta essenzialmente dai seguenti elementi fondamentali:

- un cannone elettronico con sistema da vuoto (*electron beam gun*);
- un generatore di alta tensione;

* Gran parte di questo capitolo è tratto dal libro di Giancarlo Maccarini e Lucio Enrico Zavanella, *Tecniche di lavorazione non convenzionali*, Cartolibreria Snoopy, Brescia, 2001. Il lavoro di *re-editing* è stato svolto dall'ing. Leonardo Luongo durante la sua attività come borsista presso l'Università di Pisa.

- un sistema di lenti elettromagnetiche per la focalizzazione del fascio;
- una camera di lavoro con relativo impianto da vuoto;
- un quadro di comando e controllo;
- un sistema di spostamento con movimentazione del campione;
- un programmatore a controllo numerico dei parametri di processo e della movimentazione del campione;
- un sistema di registrazione dei parametri fondamentali;
- un sistema di deflessione e pulsazione del fascio elettronico.

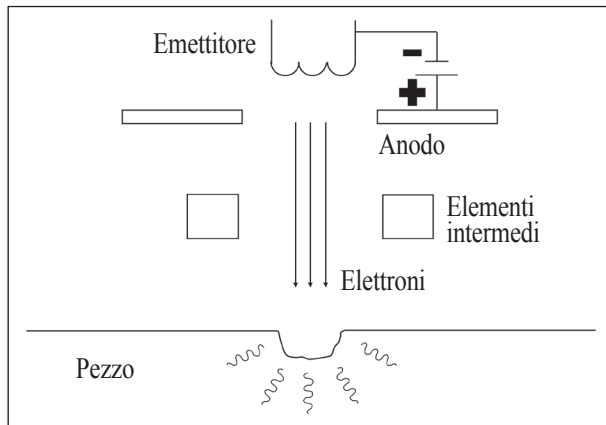


Figura 3.1 – Schema del principio di funzionamento.

3.2.1 L'emettitore

L'emettitore del fascio di elettroni ha come principali funzioni la generazione di un flusso di elettroni ad alta velocità e la sua focalizzazione. L'emettitore è costituito da un filamento di tungsteno che agisce da catodo, attraversato da una corrente variabile tra 25 e 100 mA (corrispondenti a una densità di corrente $J = 5 \div 15 \text{ A/cm}^2$); ciò comporta il riscaldamento del filamento che raggiunge temperature elevate (circa 3000°C). Da ciò nasce la necessità di introdurre un circuito di raffreddamento. L'emissione di elettroni da parte del catodo varia in funzione dei seguenti parametri:

- tensione applicata (solitamente 120-150 kV);
- temperatura del filamento;
- materiale costituente il catodo.

L'emissione di elettroni da parte del tungsteno avviene quindi ad alta temperatura; in Figura 3.2 è riportata la variazione dell'emissione elettronica al crescere della tensione applicata tra anodo e catodo, generalmente dell'ordine di 120 kV.

Ion Beam Machining

Giancarlo Maccarini, Lucio Enrico Zavanella*

4.1 Introduzione

Il principio di funzionamento di una macchina per Ion Beam Machining (IBM) consiste nella generazione di un flusso di ioni che viene accelerato contro la superficie del pezzo da lavorare. Nonostante l'apparente analogia con i sistemi di lavorazione EBM, l'asportazione di materiale, in questo caso, viene ottenuta grazie a un ben distinto fenomeno fisico, descritto in seguito. L'origine di questa tecnica di lavorazione è sicuramente riconducibile alla osservazione di un fenomeno che si verificava durante lo studio dello "sputtering" (Grove 1852; Carter e Colligon 1968). In tale occasione, durante la valutazione della conducibilità elettrica dei gas, venne messo in rilievo il deposito di particelle metalliche sulla superficie del tubo di vetro dell'esperimento, evidenziando così il progressivo consumo dell'elettrodo di metallo.

Da un punto di vista fisico, quando uno ione, dotato di molta energia, colpisce la superficie di un materiale, è in grado di passare attraverso un certo numero di piani atomici del reticolo cristallino e viene frenato dalla diffusione elastica, dovuta ai nuclei atomici, e dalla diffusione anelastica dovuta all'incontro con i gusci elettronici e gli elettroni liberi. Lo ione può impiantarsi nel target (bersaglio) o può essere retrodiffuso dalla superficie dagli atomi sottostanti come risultato della diffusione elastica tra lo ione e gli atomi del target. L'atomo è a sua volta spostato dalla sua posizione reticolare di equilibrio e, pertanto, può collidere con gli atomi circostanti, spostando anche questi ultimi dalle loro posizioni naturali all'interno del reticolo, in un processo a cascata. Durante tali collisioni un piccolo numero di atomi è espulso

* Gran parte di questo capitolo è tratto dal libro di Giancarlo Maccarini e Lucio Enrico Zavanella, *Tecniche di lavorazione non convenzionali*, Cartolibreria Snoopy, Brescia, 2001. Il lavoro di *re-editing* è stato svolto dall'ing. Leonardo Luongo durante la sua attività come borsista presso l'Università di Pisa.

(o “*sputtered*”) dalla superficie del campione. Utilizzando ioni ad alta energia, gli elettroni dell’atomo del target sono eccitati dalle diffusioni anelastiche dovute alle collisioni in cascata. Il successivo decadimento di questi è causa di emissione di fotoni e, in alcuni casi, di una notevole emissione di elettroni. Così, a seguito di questi processi, si generano una serie di fenomeni, quali: ioni residui e una struttura reticolare danneggiata del target, emissione di certi tipi di particelle come ioni retrodiffusi, atomi del bersaglio sputtered, elettroni secondari ed elettroni Auger, luce visibile e raggi X, come da Figura 4.1.

Questo processo può essere applicato per eseguire le seguenti lavorazioni:

- asportazione di materiale;
- impianto di atomi di elementi diversi all'interno del materiale del target (per esempio drogaggio);
- deposizione di atomi di materiale diverso sulla superficie del target (per esempio ricoperture);
- esecuzione di analisi di componenti presenti sulla superficie del target, sfruttando le radiazioni emesse dalla superficie del pezzo quando questo viene colpito dagli ioni del fascio.

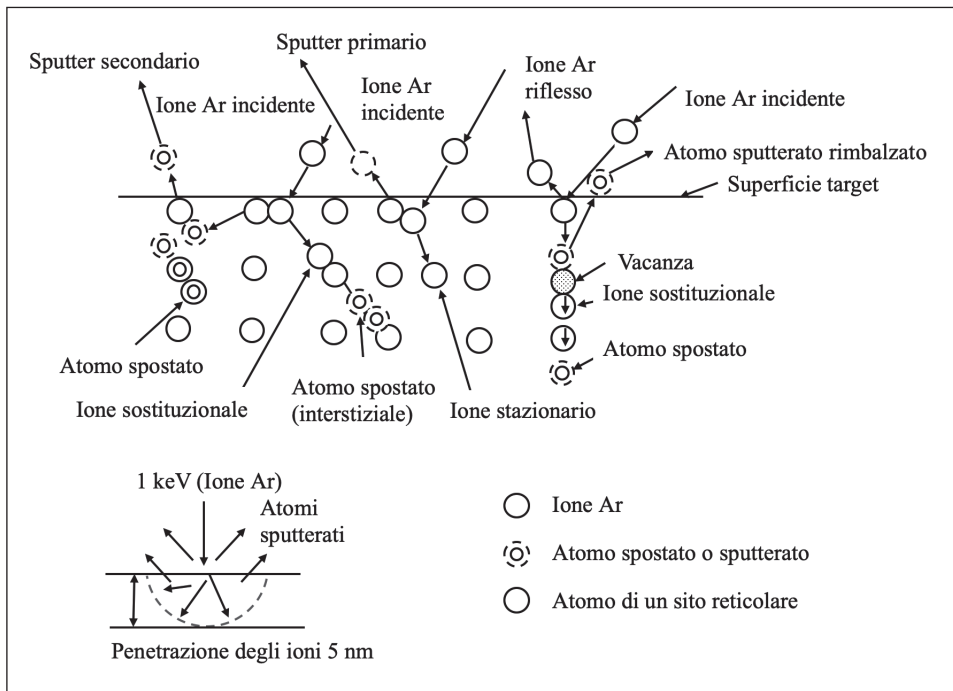


Figura 4.1 – Modello schematico delle interazioni coinvolte nei processi di collisione del fascio di ioni.

Plasma Beam Machining

Giancarlo Maccarini, Lucio Enrico Zavanella*

5.1 Introduzione

Fin dagli inizi del secolo scorso era noto che alcuni gas, riscaldati, presentano una temperatura in corrispondenza della quale si manifesta dapprima la dissociazione massiccia delle molecole e, successivamente, la scomposizione degli atomi del gas in ioni ed elettroni liberi. Un gas nel quale la maggior parte degli atomi, o delle molecole, è ionizzata si definisce plasma: in tale condizione tutte le cariche elettriche, poste all'interno del plasma, vengono schermate. A temperatura ambiente, i gas sono composti da molecole di due o più atomi, con l'eccezione dei gas inerti. Quando la temperatura sale a circa 2000 °C, le molecole iniziano a dissociarsi in atomi e, a circa 3000 °C, alcuni di questi atomi perdono parte degli elettroni, così ottenendo la ionizzazione del gas. Questo stato fisico, denominato appunto plasma, è anche caratterizzato dall'emissione di scintille ad alta frequenza.

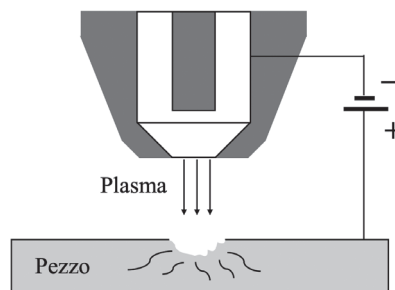


Figura 5.1 – Schema per la lavorazione al plasma.

* Gran parte di questo capitolo è tratto dal libro di Giancarlo Maccarini e Lucio Enrico Zavanella, *Tecniche di lavorazione non convenzionali*, Cartolibreria Snoopy, Brescia, 2001. Il lavoro di *re-editing* è stato svolto dall'ing. Leonardo Luongo durante la sua attività come borsista presso l'Università di Pisa.

All'inizio degli anni '50, la tecnica Plasma Beam Machining (PBM) fu presa in considerazione quale alternativa alla fiamma ossidrica per il taglio dei metalli e, in particolare, per quelli che (acciaio inox, alluminio ecc.) sono sensibili all'ossidazione. I primi risultati non furono incoraggianti a causa della scarsa qualità del taglio e della difficoltà nel controllo della velocità di asportazione del materiale. Nel caso particolare delle operazioni di taglio, la fusione del materiale lavorato viene provocata dall'arco elettrico, coadiuvato dal flusso del gas ionizzato, che determina anche l'espulsione delle scorie di metallo liquido.

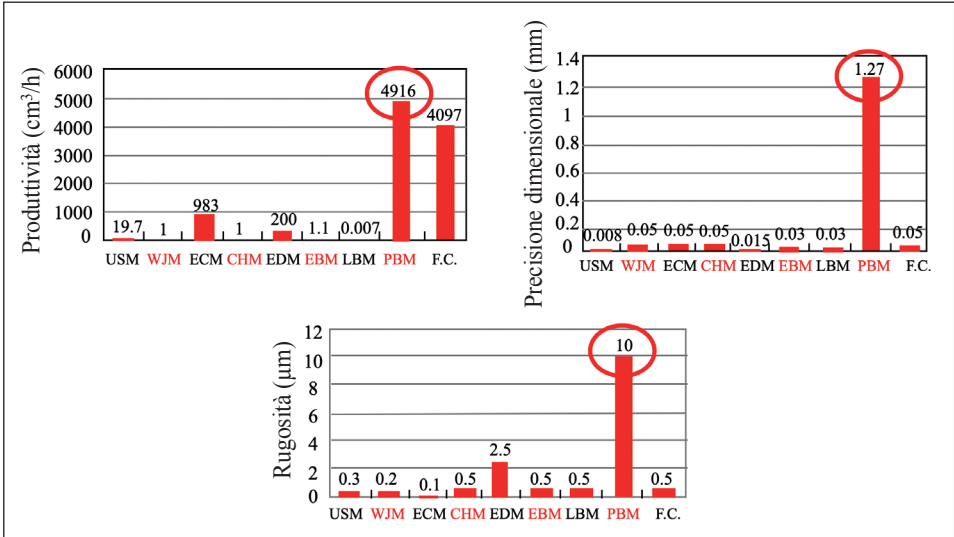


Figura 5.2 – Confronto fra le varie lavorazioni in termini di produttività, precisione dimensionale e rugosità.

5.2 Principio fisico del plasma

Il meccanismo di lavorazione del plasma coinvolge l'interazione di fenomeni termici, elettrici e fluidodinamici. Ancora oggi alcuni aspetti della lavorazione non sono del tutto chiari in quanto risulta molto complicato modellare e comprendere nel dettaglio gli effettivi meccanismi di interazione. La lavorazione viene di solito descritta facendo riferimento a quattro fasi nel caso di acciai:

1. il plasma investe la superficie del pezzo e inizia il riscaldamento del materiale superficiale fino a portarlo a fusione;
2. nella seconda fase il materiale fuso viene spinto verso il basso dalla pressione del plasma;

Ultrasonic Machining

Giancarlo Maccarini, Lucio Enrico Zavanella*

6.1 Introduzione

La possibilità di utilizzare onde ultrasoniche ad alta frequenza (70 kHz) per lavorazioni meccaniche fu inizialmente presa in considerazione da Wood e Loomis (Wood e Loomis 1927), che realizzarono i primi brevetti nel 1945. Durante lo studio della rettifica ultrasonica delle polveri abrasive, si era infatti osservato che la superficie del contenitore della polvere si disintegrava quando la punta di un trasduttore, soggetto a vibrazioni ultrasoniche, veniva accostata a essa; inoltre, la forma della cavità ottenuta riproduceva quella della punta del trasduttore. Da tale osservazione, si dedusse che molti materiali fragili (vetro, ceramica e diamante) potevano essere lavorati con tale tecnica e all'inizio degli anni '50 si ebbero le prime applicazioni. Le lavorazioni mediante tecnica ultrasonica (Ultrasonic Machining o USM) si estesero in un secondo tempo ai materiali duttili, allorché ci si rese conto che il contatto tra abrasivo e pezzo lavorato portava alla formazione di truciolo.

6.2 Principio di funzionamento

Le lavorazioni con tecnica USM si basano sulla oscillazione ad alta frequenza (circa pari a 20,000 cicli al secondo) di un utensile immerso in pasta abrasiva. Le macchine hanno in genere potenza compresa tra qualche decina di Watt e pochi kilowatt: la potenza installata influenza le dimensioni dell'utensile utilizzabile. Di seguito vengono descritti i fenomeni fisici che stanno alla base delle lavorazioni USM: di fatto, la Figura 6.1 costituisce il riferimento principale per la lettura del presente capitolo.

* Gran parte di questo capitolo è tratto dal libro di Giancarlo Maccarini e Lucio Enrico Zavanella, *Tecniche di lavorazione non convenzionali*, Cartolibreria Snoopy, Brescia, 2001. Il lavoro di *re-editing* è stato svolto dall'ing. Leonardo Luongo durante la sua attività come borsista presso l'Università di Pisa.

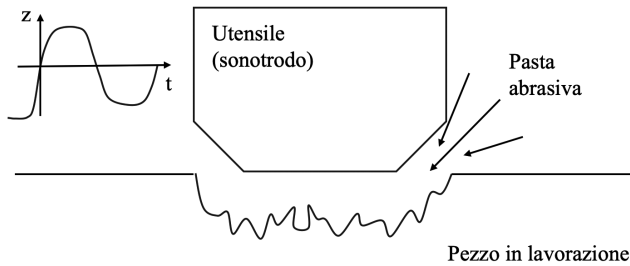


Figura 6.1 – Schema del meccanismo di lavorazione di una macchina a ultrasuoni, dove z rappresenta lo spostamento nella direzione ortogonale alla superficie.

La macchina si compone di tre elementi fondamentali (vedi Figura 6.2):

- trasduttore: è l'elemento che genera la vibrazione ultrasonora, la quale successivamente verrà convogliata sull'utensile. I principi di funzionamento del trasduttore possono essere due: magnetostrizione e piezoelettrico;
- sonotrodo o portautensile: si tratta dell'elemento centrale che consente di convogliare e amplificare l'oscillazione prodotta dall'attuatore. Si possono avere sonotrodi di varie forme e dimensioni in funzione dell'applicazione;
- utensile: è l'elemento finale che va a comprimere i grani interni alla pasta abrasiva in modo da generare l'asportazione di materiale.

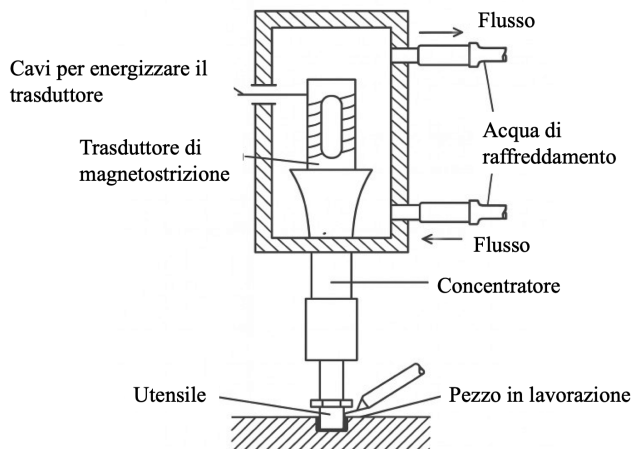


Figura 6.2 – Schema generale di una macchina per lavorazioni a ultrasuoni.

Electrochemical Machining

Michele Abruzzo, Gualtiero Fantoni

8.1 Introduzione

Sotto il nome di processi elettrochimici o Electrochemical Machining (ECM) si vanno a individuare tutti i processi che è possibile eseguire sfruttando un bagno elettrochimico all'interno del quale vengono introdotti un pezzo da lavorare e un elettrodo utensile. Lo schema generale di qualsiasi lavorazione è quello riportato in Figura 8.1.

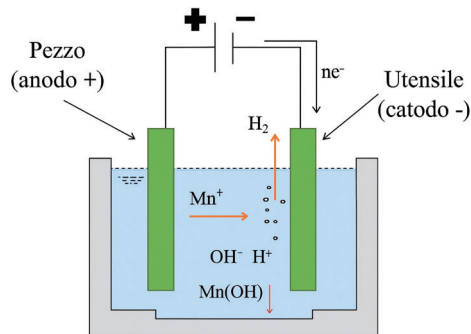


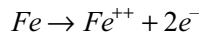
Figura 8.1 – Schema generale del processo e principio generale dell'elettrolisi.

L'utensile può essere polarizzato positivamente o negativamente in funzione della tipologia di lavorazione che si deve andare a effettuare. In generale, il bagno è costituito da acqua all'interno della quale viene disciolto un elettrolita in modo da liberare all'interno della soluzione ioni H^+ e OH^- . Questo bagno è conduttore (conduzione di seconda specie) grazie alla capacità degli ioni di muoversi all'interno del bagno stesso e trasferire della carica elettrica. Non si ha un passaggio di elettroni all'interno del bagno, in quanto gli elettroni scorrono all'interno dei fili grazie al-

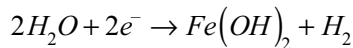
l'azione di un generatore di differenza di potenziale. Gli elettroni vengono sottratti dagli atomi dell'anodo causando la ionizzazione del metallo di cui è costituito. Lo ione di metallo entra quindi in soluzione e tende a legarsi con gli ioni OH^- in modo da formare un idrossido che precipitando si accumula nella parte bassa della soluzione. L'elettrone asportato dall'anodo viene inviato al catodo dove viene ceduto allo ione H^+ in modo da trasformarlo in idrogeno molecolare che aggregandosi forma delle bolle gassose. Le bolle che si concentrano sulla superficie del catodo tendono poi a liberarsi e andare in atmosfera. Durante il processo si possono considerare le concentrazioni di ioni presenti all'interno del fluido costanti in quanto il fluido stesso viene continuamente rinnovato.

8.2 L'elettrolisi

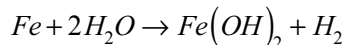
L'ECM è, in sostanza, una applicazione dell'elettrolisi, ovvero del processo chimico che si verifica quando una corrente elettrica attraversa due conduttori immersi in una soluzione liquida (Singh *et al.* 2018). In base alla reazione provocata, nel corso della lavorazione si possono sviluppare al catodo gas tossici e facilmente infiammabili (per esempio, Cl_2 e H_2). Ne segue che occorre isolare la zona di lavoro sia dal punto di vista elettrico che dal punto di vista salubre, introducendo sistemi di captazione del gas che si produce al catodo, ossia all'utensile. Per esempio, qualora l'anodo sia di ferro, esso perde elettroni che vanno al catodo e, reagendo con l'elettrolita, dà luogo a due reazioni che producono l'idrossido di ferro. Lo scopo dell'ECM è quindi quello di asportare metallo dall'anodo, riproducendo le sagome del catodo (utensile). Un semplice esempio consente di chiarire quanto appena detto. Applicando tensione tra anodo e catodo, si instaurano diverse reazioni, alcune delle quali sono però più probabili in termini energetici. Riassumendo il processo, come in Figura 8.2, le reazioni che avvengono all'anodo sono:



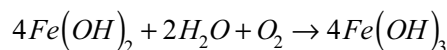
e al catodo:



Gli ioni metallici si combinano con gli ioni 2OH^- , cosicché il risultato finale è:



L'idrossido di ferro, però, a sua volta reagisce secondo la seguente relazione:



Waterjet

Massimiliano Annoni

9.1 Water Jet Machining (WJM)

Le lavorazioni a getto d'acqua, o Waterjet Machining (WJM), sono nate e si sono diffuse a partire dalla metà del 1900. Le prime applicazioni riguardavano l'utilizzo in campo minerario e forestale per il taglio della roccia e del legname (Liu *et al.* 2019). Successivamente, grazie all'aggiunta di abrasivo, l'utilizzo del WJM o, meglio, dell'Abrasive Waterjet Cutting (AWJC), si è spostato verso altre applicazioni.

Per esempio, la tecnica WJC ha trovato vasto impiego nel taglio di materiali compositi e nel campo aerospaziale, dove sia le tecnologie tradizionali sia quelle più recenti (laser) non offrono le medesime opportunità, che sono principalmente connesse con la mancanza di alterazione termica nel materiale tagliato e con la pressoché nulla formazione di bave. Inoltre, il pezzo non viene sottoposto a sforzi elevati, dal momento che la forza del getto è ridotta a poche decine di newton. Ciò è particolarmente utile nel taglio di materiali fragili per non sottoporli a flessione e a eventuale rottura.

9.1.1 Caratteristiche del processo

Il principio su cui si basa il WJM è l'asportazione di materiale per erosione e abrasione mediante un getto di acqua ad altissima velocità, circa 900 m/s (prossima a Mach 3) per una pressione standard di 400 MPa (Mach 3). L'asportazione di materiale avviene secondo due distinti meccanismi:

- **abrasione:** le particelle di materiale sono direttamente rimosse dai grani di abrasivo sotto forma di microtrucioli. Questo meccanismo è tipico dei materiali duttili sottoposti ad abrasione (Figura 9.1), cioè all'azione del getto d'acqua a basso angolo di impatto, come avviene nella parte alta di un solco tagliato mediante

waterjet. L'abrasivo si comporta come un microutensile da taglio che produce trucioli per deformazione plastica;

- erosione e delaminazione: nel caso della delaminazione, il getto d'acqua, dopo essere penetrato nel materiale, si insinua nelle porosità o nei difetti del materiale stesso, generando delle forze tali da far distaccare intere porzioni di materiale (craterizzazione della superficie oppure delaminazione nei compositi).

Questo meccanismo si chiama erosione e avviene quando il getto d'acqua incide sul materiale ad alto angolo di impatto. L'erosione è particolarmente efficace nella rimozione di materiali fragili e può essere controllata (Figura 9.1).

L'erosione avviene nella parte bassa di un solco tagliato mediante waterjet. A causa della perdita di energia del getto in profondità, il solco di taglio è sempre retroflesso, sia per materiali duttili sia per materiali fragili. Questo comporta la variazione dell'angolo di impatto, che è nullo nella parte alta del solco e tende a crescere andando in profondità.

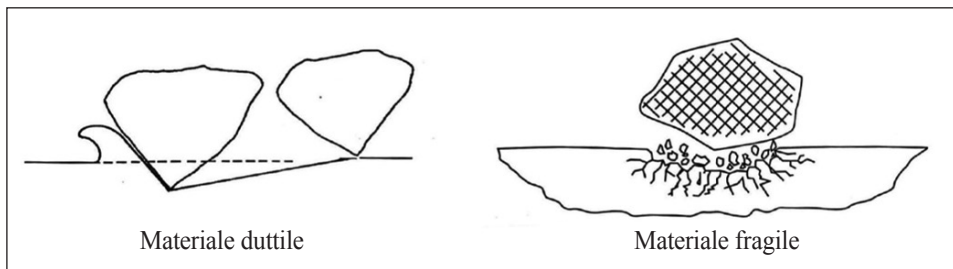


Figura 9.1 – Meccanismo di interazione tra abrasivo e materiale nel caso duttile e nel caso fragile (Hashish 1984).

Il taglio a getto d'acqua è efficace su tutti i tipi di materiale non essendo soggetto alla loro conducibilità elettrica ed essendo poco sensibile alle loro caratteristiche meccaniche.

Si possono tagliare convenientemente sia materiali tenaci e duttili sia materiali duri e fragili. Inoltre, a differenza di altri processi convenzionali e non convenzionali, il WJC vanta ottime performance su materiali fibrosi, granulari, spugnosi e multi-strato. Il tasso di asportazione del materiale dipende strettamente dalla sua resistenza e densità, dalla sua porosità e struttura.

Laser Material Processing

Giuseppe Macoretta

10.1 Introduzione

LASER è un acronimo per “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (amplificatore di luce per mezzo dell’emissione stimolata di radiazione). L’energia generata è energia luminosa, cioè energia elettromagnetica (fotoni). Il processo di asportazione di materiale tramite tecnologia laser è sostanzialmente basato sulla interazione di un intenso fascio di luce monocromatica, coerente e collimata con un pezzo. Il materiale viene rimosso per vaporizzazione, in quanto l’impatto dell’onda di energia luminosa col materiale da lavorare comporta la trasformazione dell’energia radiante in energia termica. In base alla densità di energia per unità di superficie del fascio laser, si possono eseguire varie operazioni tecnologiche: taglio, foratura, saldatura e trattamenti termici.

La luce generata da un laser, a differenza di una normale sorgente luminosa, gode delle seguenti caratteristiche:

- è altamente monocromatica, in quanto il fascio emesso ha una sola lunghezza d’onda caratteristica (la riga di emissione è molto stretta), anche se determinate sorgenti laser emettono su più lunghezze d’onda (laser accordabili);
- è dotata di elevata coerenza sia spaziale che temporale, ovvero tutte le onde elettromagnetiche partono dalla sorgente in fase tra di loro;
- è fortemente direzionale (collimata), il fascio emesso presenta una scarsa tendenza a divergere, secondo un cono, durante il tragitto;
- è dotata di una elevata intensità luminosa.

Per una migliore comprensione, si confronti la luce emessa da una sorgente di luce ordinaria con quella caratteristica di una sorgente laser (Figura 10.1).

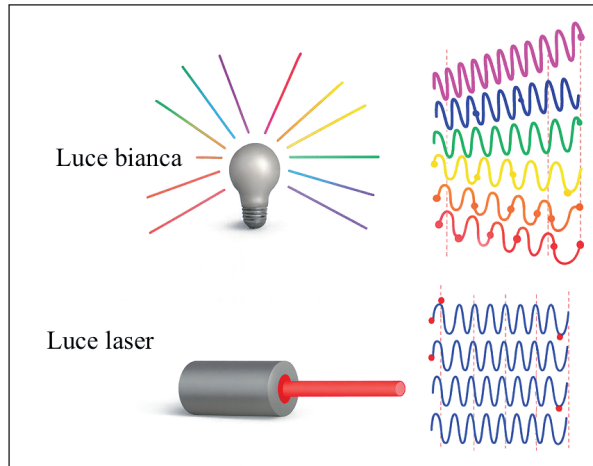


Figura 10.1 – Confronto fra luce bianca e luce laser.

La luce ordinaria non è monocromatica (infatti, ogni sorgente di questo tipo presenta uno spettro di emissione caratteristico, che è continuo) e ogni singola radiazione luminosa emessa non risulta in fase con un'altra (incoerenza: la fase di un'onda è diversa da quella di un'altra). Infine, le radiazioni vengono emesse in tutte le direzioni, non esistendo una direzione preferenziale di emissione, come invece si osserva per il laser. La capacità che hanno i laser di produrre intensi impulsi di radiazione apre la possibilità a numerose applicazioni riguardanti il riscaldamento, la fusione e la vaporizzazione dei materiali. La caratteristica principale del laser, che consente una sua applicazione nella lavorazione dei metalli, è la capacità di rilasciare elevate potenze per unità di superficie in regioni localizzate sul pezzo in lavorazione. Una sorgente termica convenzionale, come un cannello di saldatura, rilascia una potenza per unità di superficie molto inferiore, che non può essere limitata altrettanto bene a una zona ristretta. Sotto questo aspetto, solo un fascio di elettroni può essere paragonato a un laser, sebbene ci siano sostanziali differenze. Per una sorgente laser la caratteristica più importante non è la potenza totale emessa, ma è la densità di potenza che si riesce a focalizzare in un punto. Una lampadina da 200 W non fonde il metallo: un laser in continua da 200 W è in grado di farlo. Per focalizzare il fascio laser si ricorre a un dispositivo ottico di focalizzazione del fascio (lenti) collocato all'uscita della sorgente. Le caratteristiche dell'ottica sono strettamente connesse con il tipo di lavorazione da eseguire (taglio, saldatura, trattamento termico e simili). La caratteristica principale della luce laser è che, a differenza della luce ordinaria, può essere focalizzata su uno specifico punto attraverso l'utilizzo di una lente.



Manuale delle **tecnologie di lavorazione non convenzionali**

A cura di
Gualtiero Fantoni e Michele Abruzzo

Il volume analizza in modo sistematico le lavorazioni non convenzionali, affrontando i principi fisici, i parametri di processo e le prestazioni ottenibili. Sono trattate in dettaglio elettroerosione; lavorazioni elettrochimiche; lavorazioni a fascio di elettroni e a fascio di ioni; al plasma, a ultrasuoni; saldature per attrito, lavorazioni a getto d'acqua con e senza abrasivo; lavorazioni mediante sorgenti laser e fabbricazione additiva, evidenziandone vantaggi, limiti e campi applicativi.

L'opera integra modelli teorici, dati sperimentali e criteri comparativi con i processi convenzionali, fornendo un quadro coerente per la valutazione delle tecnologie più idonee in funzione di materiali, geometrie e requisiti prestazionali. Particolare attenzione è rivolta all'integrità superficiale, alla qualità delle lavorazioni e agli aspetti di sostenibilità.

Scritto da diversi docenti universitari e professionisti, il testo si propone come riferimento per la ricerca e la didattica avanzata, offrendo un supporto metodologico nell'affrontare le sfide poste dai materiali avanzati e dalle applicazioni industriali ad alta precisione. Si rivolge quindi agli studenti dei corsi di Ingegneria Meccanica e Industriale e ai tecnici dei settori produttivi dell'industria manifatturiera.



tecniche nuove
www.tecnichenuove.com

€ 59,90

ISBN 978-88-481-4963-1

