

In questo articolo, si riportano esempi di processi operanti secondo diversi principi fisici, a conferma che **la trattazione energetica basata sull'exergia (energia) specifica ha valore generale**



Energia specifica

La carta d'identità energetica dei processi

■ **Massimiliano Annoni**

Questo articolo segue la traccia sviluppata nell'articolo "Scegliere i processi di lavorazione in funzione del consumo energetico", pubblicato su *Macchine Utensili* di marzo 2025. In quell'articolo, si era evidenziato come, per ogni processo di lavorazione, si possa valutare l'exergia, vale a dire l'energia disponibile al processo per essere convertita in lavoro meccanico o scambio termico utile per trattare il materiale target.

L'exergia specifica per unità di volume richiesta dal processo dipende fortemente dalla produttività: a elevata produttività, il processo tende a richiedere soltanto la quantità di energia

necessaria a trattare l'unità di volume del materiale lavorato in quanto la quota costante di energia richiesta per mantenere attivo il processo, e le macchine che lo implementano, anche in stato di produttività nulla viene distribuita su portate elevate di materiale, diventando quindi trascurabile.

Non tutti i processi possono lavorare a portate elevate. Sicuramente i processi che si occupano di sgrossatura o delle prime fasi di una process chain (es. fonderia, deformazione plastica massiva, ecc.) possono arrivare a consumare solo lo stretto necessario per trasformare i materiali, ma i processi di finitura e quelli di

estrema precisione, lavorando a portate di materiale molto basse (es. elettroerosione, processi legati alla microelettronica, ecc.), richiedono un maggiore esborso energetico dovuto al fatto che le macchine e gli organi ausiliari necessitano di molta energia anche soltanto per rimanere attivi e la loro richiesta energetica non può essere suddivisa su grandi quantità di materiale in output.

In questo articolo, si riportano esempi di processi operanti secondo diversi principi fisici, per i quali vale quanto esposto, a conferma che la trattazione energetica basata sull'exergia (energia) specifica ha valore generale.



In apertura: una fase di taglio con macchina waterjet

Taglio Waterjet

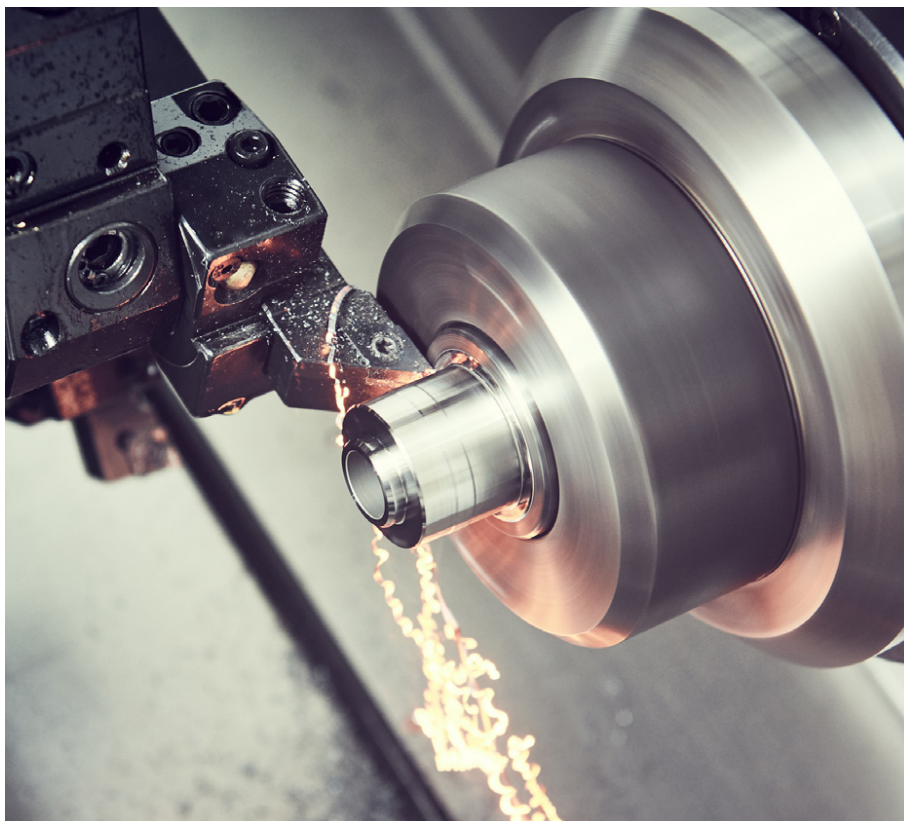
Il taglio a getto d'acqua (waterjet cutting) è un processo di rimozione di materiale a freddo che si basa sull'azione erosiva dell'acqua e abrasiva/erosiva di particelle contenute in essa per rimuovere materiale dal pezzo lavorato. Nel caso di getto idroabrasivo (abrasive waterjet cutting, AWJ), il più interessante nell'industria metalmeccanica, il singolo grano di abrasivo, dotato dell'energia cinetica conferitagli dall'acqua, rimuove microtrucioli di materiale risultando molto delicato nella rimozione (forze di taglio pari a qualche decina di newton al massimo) e anche molto accurato (anche meno di 0,01 mm di tolleranza dimensionale sul pezzo) nella sua configurazione micro abrasive waterjet.

Nel corso Advanced Manufacturing Processes A, offerto agli studenti del track Sustainable Manufacturing Engineering (CM4) della Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica del Politecnico di Milano, si spiega l'equazione:

$$Q_{\text{mat}} = \xi \cdot \frac{P_{\text{abr}}}{e_c}$$

dove Q_{mat} è la portata di materiale rimosso, ξ è l'efficienza con la quale viene utilizzata l'energia dal processo per la rimozione di materiale, P_{abr} è la potenza abrasiva a disposizione del getto d'acqua e e_c è l'energia specifica richiesta dal materiale per la rimozione di una unità di volume. Se P_{abr} è espressa in watt e e_c è espressa in J/m^3 , Q_{mat} risulta espresso in m^3/s .

P_{abr} si può calcolare come la potenza cinetica (cioè energia cinetica nell'unità di tempo) di-



sponibile all'acqua e alle particelle di abrasivo, che dipende dalla pressione dell'acqua a monte dell'ugello primario (l'ugello attraverso il quale l'acqua vede la trasformazione da energia di pressione a energia cinetica), dal diametro dell'ugello primario (getti più grandi sono più potenti) e dalla portata di abrasivo.

La cosa più interessante dell'equazione 1 però è che e_c , in prima approssimazione, secondo la letteratura possa essere considerata pari all'energia necessaria per fondere il materiale. Nell'articolo di marzo avevamo osservato come l'energia per fondere il materiale fosse il minimo quantitativo di energia specifica per lavorare materiali di interesse industriale come il ferro o l'alluminio. Ogni altro processo che non sia la fusione, comporta un'energia specifica maggiore, cosicché ci si aspetta che il getto d'acqua richieda un'energia specifica maggiore rispetto alla fusione. Di fatto ciò significa che più il processo sfrutta meccanismi complessi e diverse trasformazioni di energia dal punto di vista fisico, più richiede energie specifiche elevate per rimuovere l'unità di volume di materiale lavora-



Asportazione truciolo mediante tornitura da barra

to. Nell'articolo (1), vengono riportati dati energetici relativi al taglio abrasive waterjet di alluminio 6082, per cui si rileva un'energia specifica e_c che varia da 37 a 60 J/mm^3 . Considerando la densità dell'alluminio pari a 2700 kg/m^3 , si ottengono dai 13 ai 22 MJ/kg corrispondenti a portate di materiale rimosso da 0,13 a 0,26 kg/h , che pongono questi dati non lontano da quanto rilevato in (2) per il taglio waterjet (Figura 1), anche considerando che in (1) viene conteggiata solo l'energia posseduta dall'abrasivo e non dall'acqua, per cui il range 13-22 MJ/kg è una sottostima dell'energia specifica necessaria al taglio AWJ.

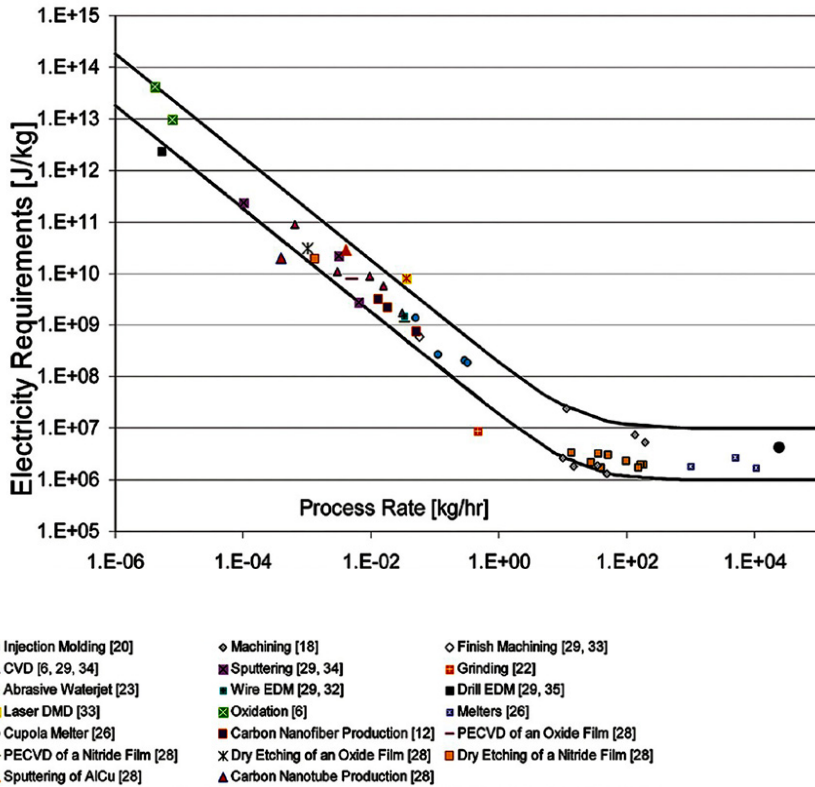


Figura 1: Lavoro sotto forma di elettricità utilizzato per unità di materiale lavorato per vari processi di produzione in funzione del tasso di lavorazione del materiale (2)

Deformazione plastica e asportazione di truciolo

Per avere un confronto tra quanto ottenuto per il getto d'acqua e quanto si potrebbe ottenere da un processo che intrinsecamente mette in gioco meno passaggi tra forme di energia diverse, quindi meno perdite, come una deformazione plastica, possiamo considerare il caso in cui si voglia ridurre di diametro una barra di acciaio AISI 304 per passare da 12,7 a 12,2 mm, come in un esempio riportato nel testo "Tecnologia Meccanica", S. Kalpakijan, S.R. Schmidt, Edizioni Pearson.

Questa riduzione di diametro si può ottenere semplicemente sottoponendo la barra a trazione, come si farebbe in una prova di trazione. Il cosiddetto lavoro di deformazione, cioè l'energia specifica di deformazione, vale in questo caso 23 MJ/m³ che, considerando la densità dell'acciaio di 7900 kg/m³, equivale a 0,0029 MJ/kg quindi molto meno all'energia che serve per asportare materiale tramite AWJ e anche

al di sotto della linea orizzontale in basso a destra nel grafico di Figura 1, coerentemente con quanto riportato in (2) per i processi di deformazione plastica. Si ricorda che 1 MJ/kg è approssimativamente uguale al lavoro minimo (o energia minima) richiesto per fondere l'alluminio o il ferro (v. "Scegliere i processi di lavorazione in funzione del consumo energetico", Macchine Utensili, marzo 2025). Stiamo quindi affermando che, per deformare plasticamente un acciaio, ci serve molta meno energia rispetto all'energia richiesta per fonderlo, cosa che appare perfettamente plausibile.

Se ora volessimo ottenere lo stesso risultato asportando truciolo per tornitura dalla barra di AISI 304, noteremmo che l'energia richiesta per la lavorazione è 14 volte superiore a causa del fatto che l'asportazione di truciolo deforma molto di più il materiale rispetto a quando strettamente necessario (anche 21 volte di più rispetto a una semplice trazione), inoltre coinvolge fenomeni di attrito tra utensile e pezzo che non sono presenti nella pura trazione. L'energia specifica dell'asportazione di truciolo è, in questo esempio, pari a 0,52 MJ/kg, comunque sempre appena al di sotto della linea orizzontale del grafico di Figura 1, a testimoniare che, sebbene più dispendiosa, l'asportazione di truciolo fa parte dei processi meno energivori. Cosa diversa si ha se si considerano operazioni di finitura o microlavorazioni meccaniche, nei quali anche l'asportazione di truciolo può muoversi in alto e a sinistra nel grafico di Figura 1.

Grazie alla trattazione precedente pubblicata nell'articolo "L'energia in tornitura e fresatura" (Macchine Utensili, novembre 2024), sappiamo che la pressione di taglio che si usa per calcolare le forze in tornitura, fresatura e tutti gli altri processi di asportazione di truciolo, equivale all'energia richiesta per asportare un'unità di volume di materiale, cioè all'energia specifica. Per questo possiamo leggere direttamente nel

TORNITURA GENERALE DATI DI TAGLIO

Velocità di taglio consigliate

Le raccomandazioni si riferiscono ad un impiego con fluido da taglio

ISO N		Metalli non ferrosi	Forza di taglio specifica k_{c1}	Durezza Brinell
Codice MC	No. CMC	Materiale	N/mm ²	HB
N1.2.Z.UT	30.11	Leghe di alluminio Stampate o stampate e trafilate a freddo, non invecchiate	400	60
N1.2.Z.AG	30.12	Stampate o stampate ed invecchiate	650	100
N1.3.C.UT		Leghe di alluminio Fuse, non invecchiate	600	75
N1.3.C.AG		Fuse o fuse ed invecchiate	700	90
N1.4.C.NS	30.41	Leghe di alluminio Fuse, Si 13-15%	700	130
	30.42	Fuse, Si 16-22%	700	130
N3.3.U.UT	33.1	Rame e leghe di rame Leghe al piombo, Pb $\geq 1\%$	550	110
N3.2.C.UT	33.2	Ottone, metalli rosa, $\leq 1\%$ Pb	550	90
N3.1.U.UT	33.3	Bronzo e rame senza piombo compreso rame elettrolitico	1350	100

Figura 2: Tabella dei dati di taglio per la tornitura tratta dal Catalogo Utensili di Tornitura 2020 (Sandvik Coromant). La tabella riporta la pressione specifica di taglio k_{c1} , anche detta forza di taglio specifica

catalogo dei produttori di utensili il valore di k_{c1} , cioè la pressione specifica di taglio ottenuta per un'area della sezione del truciolo di 1 mm², e avere direttamente il valore di energia specifica ad essa equivalente. Per esempio, se dobbiamo tornire leghe di alluminio stampate e non invecchiate, possiamo leggere dal catalogo di un utensiliere (Figura 2) il valore $k_{c1} = 400$ N/mm² che, effettuate le equivalenze, porta a 0,4 J/mm³ e, considerata la densità dell'alluminio di 2700 kg/m³, fornisce il valore di circa 0,15 MJ/kg, giustamente inferiore al valore di 0,52 MJ/kg precedentemente ottenuto per l'acciaio AISI 304 e enormemente inferiore all'energia specifica richiesta per il taglio AWJ precedentemente stimata (13-22 MJ/kg).

Estrusione di materie plastiche

Per dimostrare come la considerazione secondo cui ad alta produttività si hanno le migliori performance energetiche del processo e per mostrare la versatilità dell'approccio, si riporta il caso dell'estrusione di materiali polimerici. Nell'articolo scientifico (3), si dimostra come il consumo di energia specifico (specific energy consumption, SEC), cioè l'energia consumata da un estrusore per produrre un'unità di massa dell'estruso, diminuisca all'aumentare della velocità di rotazione della vite, quindi all'aumentare della portata di materiale estruso, indipendentemente dalla geometria della vite. Per alcuni materiali, la SEC risale leggermente ad un ulteriore aumento della velocità di rotazione della vite, senza però alterare la tendenza generale. Una possibile spiegazione per cui la SEC veda il suo massimo alle condizioni di bassa temperatura e velocità è che il materiale rimanga altamente viscoso rispetto a quando si spinge su tali parametri. Per questo, la resistenza del materiale al flusso rimane alta, richiedendo coppie elevate al motore della vite e, allo stesso tempo, elevato calore alle resistenze, che in questo caso è la quota di calore più rilevante rispetto a quello generato dall'attrito e dal moto viscoso del materiale. All'aumentare della velocità di rotazione della vite dell'estrusore, la potenza al

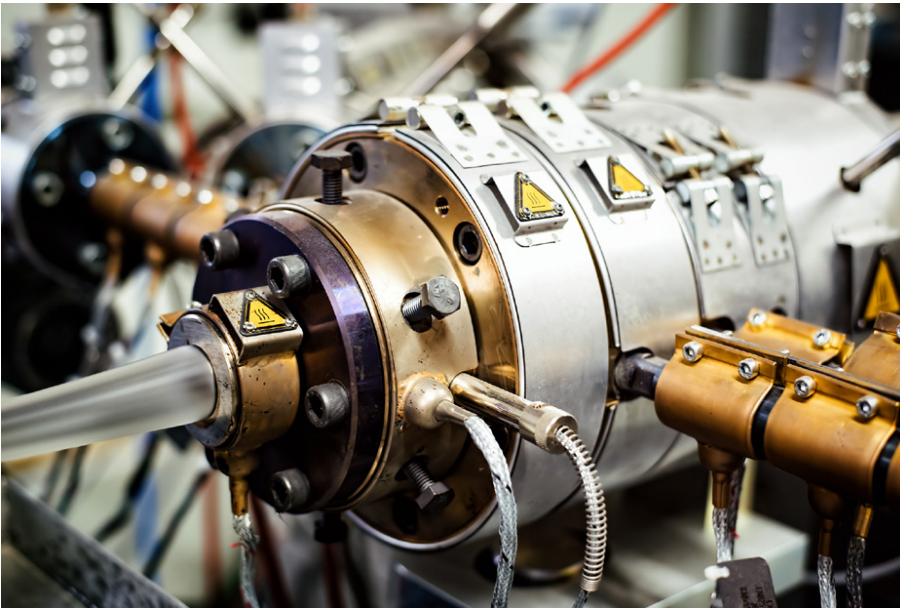
motore aumenta e diventa pressoché pari alla potenza totale richiesta alla rete in quanto i resistori non sono più necessari in questo caso, dato che la quota di calore generata per attrito e per il moto viscoso diventano preponderanti. Sebbene la potenza al motore cresca, la portata di materiale estruso cresce maggiormente, portando a un valore di SEC inferiore e a una maggiore efficienza energetica.

Elettroerosione e Laser

Cambiamo ancora processo, considerando uno dei processi più precisi nel panorama delle lavorazioni meccaniche, l'elettroerosione (electrical discharge machining, EDM).

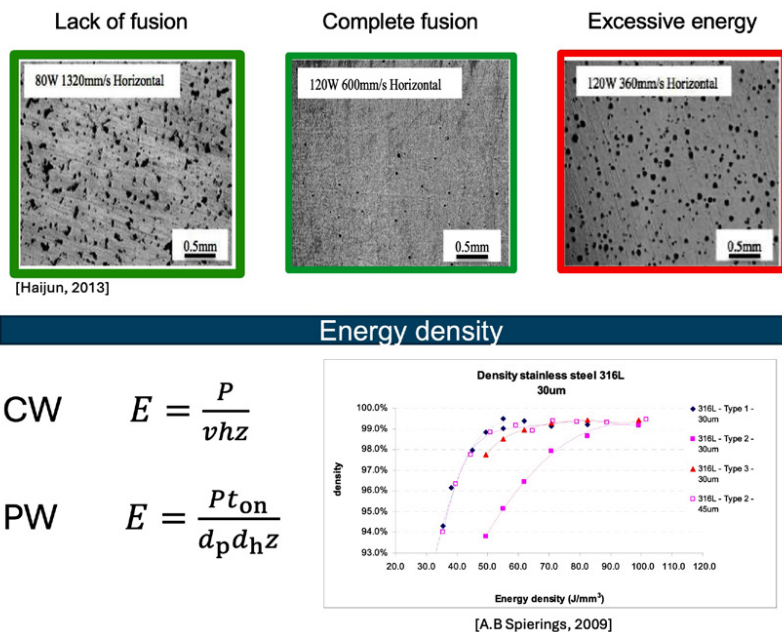
L'EDM rimuove materiale grazie all'energia termica generata dagli elettroni e dagli ioni accelerati nel gap tra elettrodo e pezzo dal campo elettrico prodotto nel gap stesso dalla tensione applicata, che genera la rottura del dielettrico e permette il passaggio di corrente. Gli elettroni impattano contro l'anodo (cioè il pezzo nel caso di EDM a filo o microEDM) e gli ioni positivi impattano contro il catodo (cioè il pezzo nel caso di EDM a tuffo o die-sinking EDM), rilasciando la loro energia cinetica sotto forma di calore. Sia il pezzo sia l'elettrodo subiscono asportazione di materiale, ma, scegliendo opportunamente la polarità e i parametri di processo, tra cui il tempo attivo t_{on} è sicuramente il più rilevante, si può fare in modo che la rimozione di materiale avvenga in misura molto maggiore al pezzo, rendendo sostenibile il processo dal punto di vista economico. L'EDM è un processo lento e costoso, ma è necessario per soddisfare tolleranze al micron su materiali conduttivi difficili da lavorare e su spessori elevati, pari anche a varie centinaia di mm nel caso dell'elettroerosione a filo (wire EDM, WEDM).

L'energia di scarica di un impulso si calcola in EDM come il prodotto tra tensione, corrente e t_{on} . t_{off} è il tempo passivo necessario al proces-



Fase di estrusione di materiale plastico

Figura 3: Energia specifica e porosità nel Selective Laser Melting (SLM). CW: continuous wave (laser in continuo), PW: pulsed wave (laser impulsato), E: energia specifica, P: potenza, v: velocità di deposizione, h: distanza tra le passate (hatch distance), z: spessore del layer (layer thickness), t_{on} : tempo attivo, d_p : distanza tra due impulsi successivi lungo la direzione di avanzamento (point distance), d_h : distanza trasversale tra due impulsi. Tratto dai lucidi del corso di Advanced Manufacturing Processes A del Politecnico di Milano

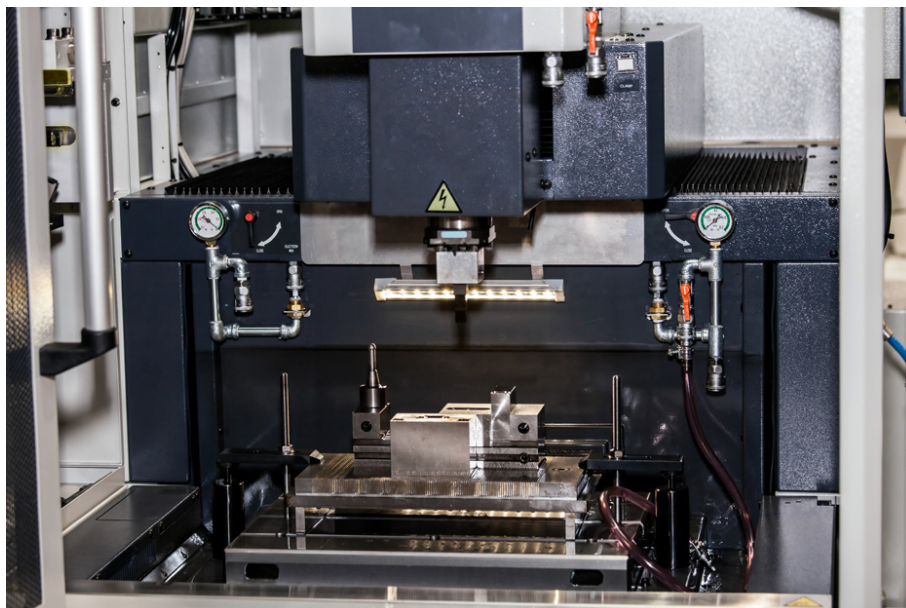


so per pulire la zona in cui l'impulso ha generato un cratere dai residui e permettere che la prossima scarica avvenga altrove permettendo l'autoregolazione del processo in modo stocastico. Dividendo l'energia di scarica per il tempo ciclo totale $t_{on} + t_{off}$, si ha la potenza media dell'impulso che, ulteriormente divisa per il tasso di asportazione di materiale (vale a dire il volume del cratere diviso il tempo ciclo) fornisce

l'energia specifica media.

L'articolo (4) svolge un interessante confronto tra la foratura EDM e la foratura mediante laser a impulsi ultracorti (femtosecondi) nel caso di fori di diametro 180 ± 3 micron profondi 350 micron su acciaio inox AISI 440C.

Il laser nei femtosecondi è una tecnologia in grado di asportare materiale agendo senza produrre alterazioni termiche sul pezzo lavorato



Una macchina per
elettroerosione

grazie al fatto che il tempo di interazione è così corto che l'energia termica non viene trasferita all'interno del materiale, ma agisce soltanto in superficie, ablatando porzioni microscopiche dello stesso. La portata di materiale rimosso è molto bassa, ma la qualità è elevatissima. Come per l'EDM, non si ha formazione di bava per cui queste due tecnologie sono ideali per realizzare fori di piccole dimensioni dalla geometria pressoché perfetta, come serve ad esempio per gli iniettori dei motori diesel e per altri ugelli. Si rimanda all'articolo (4) per i parametri di processo utilizzati per i due processi e per la qualità ottenuta, migliore per il laser in questo caso. Per quanto riguarda il parametro SEC, l'EDM ottiene un valore di $2,4 \text{ kJ/mm}^3$ contro un valore di $1,6 \text{ kJ/mm}^3$ per il laser. Questa performance porta i due processi a valori attorno a 200 MJ/kg per il laser nei femtosecondi e 300 MJ/kg per la foratura EDM, almeno per i range di parametri studiati in (4). L'EDM può però arrivare anche a ordini di grandezza in più (Figura 1) nel caso di applicazioni micro ancora più spinte.

Questo conferma, come si diceva prima, che processi più precisi e a bassa produttività portano a energie specifiche più elevate.

Additive Manufacturing

Per concludere, si vuole confermare la grande valenza dell'approccio basato sull'energia specifica mostrando come questo parametro spieghi il comportamento di una tecnologia additiva come il Selective Laser Melting (SLM). La quantità di energia specifica fornita alla polvere deve essere ottimale in questo processo per non produrre porosità nel pezzo finale. La porosità va infatti ridotta al minimo in un pezzo additivo in quanto riduce le sue performance meccaniche statiche e dinamiche.

La letteratura spiega come esista un valore di energia specifica per il quale questo avviene. Un valore inferiore porterebbe a una mancata fusione locale di alcune porzioni di polvere (lack of fusion), mentre un valore eccessivo di energia specifica potrebbe vaporizzare il materiale che poi rimarrebbe nella matrice metallica dando luogo a porosità.

Per quanto riguarda l'energia specifica ottimale per SLM di acciaio inox AISI 316L, abbiamo circa 60 J/mm^3 , che, considerata la densità del materiale (8030 kg/m^3), portano a $7,47 \text{ MJ/kg}$. Si noti come tale valore sia maggiore rispetto alla semplice fusione a causa della maggio-

re complessità del processo in termini di trasformazioni energetiche. Inoltre, questo valore non considera il rendimento della sorgente laser che, nei casi migliori di laser in fibra, arriva al 35 %, portando l'energia specifica a tre volte tanto e a circa 20 volte rispetto all'energia minima necessaria per fondere il materiale.

Per inserire l'additive nel grafico di Figura 1, dovremmo considerare il build rate (tasso di deposizione) anziché il material removal rate (tasso di asportazione del materiale, MRR) che per sua natura ha segno opposto.

Questa estensione apre il campo a importanti valutazioni sulla sostenibilità energetica di process chain composte da più processi, sottrattivi o additivi, atti a svolgere le singole fasi di lavorazione. ■

Riferimenti bibliografici

- (1) F. Perotti, M. Monno, M. Annoni, *Investigation of the influence of the AWJ-specific energy on the cutting kerf profile on aluminium 6082*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 130, pages 2799–2809 (2024), <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12841-9>
- (2) Gutowski, T., Branham, M., Dahmus, J., Jones, A.J., Thiriez, A., Sekulic, D.P., 2009. *Thermodynamic analysis of resources used in manufacturing processes*. *Environ. Sci. Technol.* 43, 1584-1590
- (3) C. Abeykoon, P. Pérez, and A. L. Kelly, *The effect of materials' rheology on process energy consumption and melt thermal quality in polymer extrusion*, *Polym Eng Sci*, vol. 60, no. 6, pp. 1244–1265, Jun. 2020, doi: 10.1002/pen.25377
- (4) A. Franco, C. A. A. Rashed, L. Romoli, *Analysis of energy consumption in microdrilling processes*, *Journal of cleaner production* 137 (2016) 1260–1269