



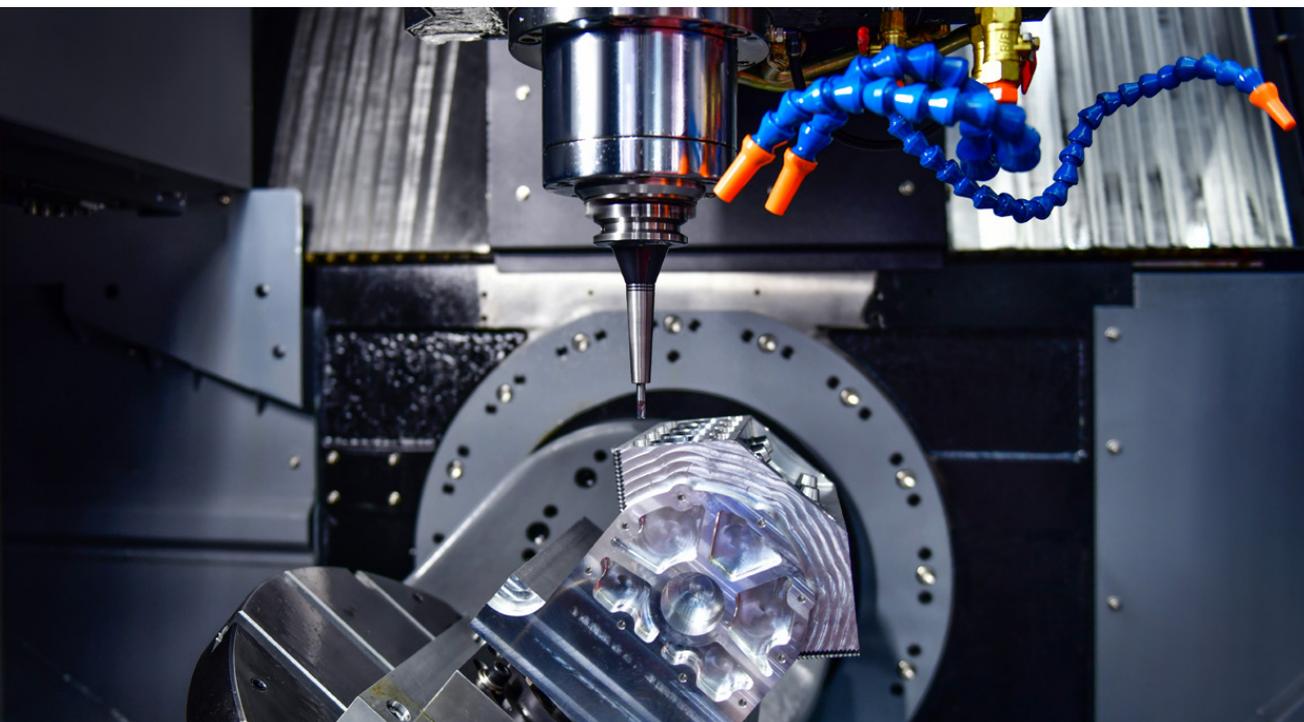
Scegliere i processi di lavorazione in funzione del consumo energetico

Questo articolo prosegue l'analisi energetica delle lavorazioni di fresatura già affrontato con l'articolo **“L'energia in tornitura e fresatura”**, pubblicato su *Macchine Utensili* di novembre 2024 e l'articolo **“Ottimizzare l'energia in fresatura”**, pubblicato su *Macchine Utensili* di dicembre 2024

■ Massimiliano Annoni



Fresatrice
a 5 assi
con tavola
basculante



Come sappiamo, un componente meccanico e un oggetto in generale può essere prodotto scegliendo processi diversi e alternativi. La scelta si basa su molti vincoli dettati dalla realtà aziendale che deve produrre il componente, ma sicuramente proviene da un'ottimizzazione di tipo tecnico-economico.

In questo articolo si vuole aggiungere un altro criterio, da aggiungere ai precedenti, cioè il consumo di energia richiesto per la lavorazione che, come vedremo, dipende dal processo che si sceglie a parità di materiale da lavorare. In questo articolo, si fa riferimento al lavoro del prof. Timothy Gutowski del Massachusetts Institute of Technology (MIT), particolarmente adatto per porre le basi del confronto tra processi di lavorazione e trasformazione dei materiali basato sull'energia richiesta (1, 2, 6).

Il concetto di exergia

Nel tentativo di tenere conto dei numerosi flussi in entrata e in uscita di un processo di produzione, il concetto termodinamico di exergia o lavoro disponibile può semplificare notevolmente il problema (1).

"In termodinamica l'exergia di un sistema è la massima frazione di energia di prima specie (meccanica, elettrica, potenziale, cinetica, elet-

tromagnetica, chimica) che può essere convertita in lavoro meccanico mediante macchina reversibile. L'exergia si conserva nei processi reversibili e diminuisce nei processi irreversibili" (Wikipedia).

L'exergia, quindi, misura il potenziale dei materiali di compiere lavoro. I combustibili possiedono naturalmente valori elevati di exergia, ma molti altri materiali, tra cui metalli puri, plastiche e altre sostanze organiche, possono avere valori altrettanto elevati. Il vantaggio dell'uso dell'exergia è che permette di esprimere gli input e gli output di materiali ed energia nella stessa unità, solitamente joule (joule, J).

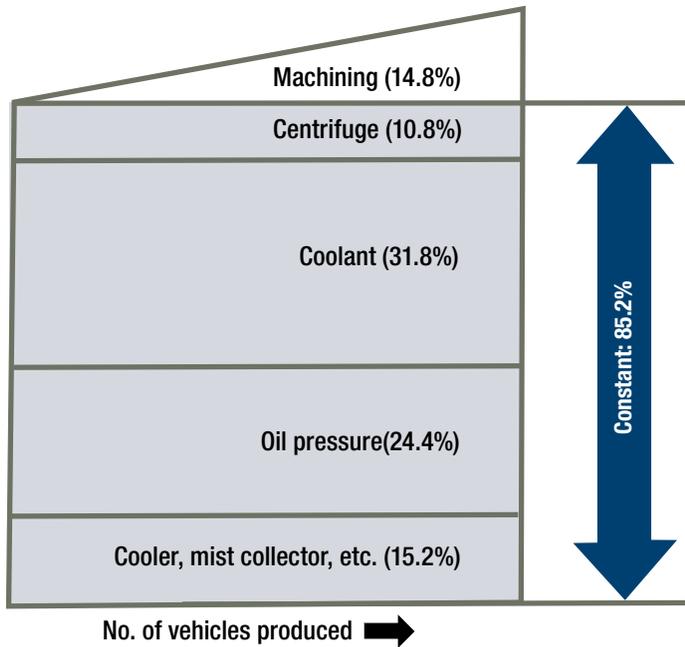
La differenza tra gli input e gli output rappresenta l'exergia persa. Questa è espressa nell'equazione 1:

$$B_{in} - B_{out} = B_{lost} \quad \text{Eq.1}$$

Questa formulazione può essere utilizzata per tenere conto delle trasformazioni dei materiali, inclusa la conversione delle materie prime in prodotti, rifiuti ed emissioni, nonché la conversione dei combustibili (attraverso la combustione) in calore (per compiere lavoro), rifiuti ed emissioni.

Nella stragrande maggioranza dei casi, la trasformazione dei materiali lavorati e la trasformazione dei combustibili avvengono come attività separate, sebbene interconnesse. L'esempio più diretto di questo, rilevante per il caso in esame, è la conversione dei combustibili per produrre elettricità, necessaria ad alimentare il processo di trasformazione dei materiali. Questo vale, ad esempio, per operazioni come la lavorazione meccanica, la rettifica, lo stampaggio a iniezione, la lavorazione per elettroerosione (EDM), la deposizione CVD e altre, tutte alimentate da una reazione chimica presso la centrale elettrica che fornisce l'elettricità necessaria per trasformare i materiali in fabbrica. In questi casi, i due processi separati, uno relativo ai materiali lavorati e l'altro ai combustibili, possono essere combinati e valutati secondo l'equazione 1. In alternativa, possono essere trattati separatamente secondo l'equazione 1 e poi combinati. In questo articolo, che si concentra sui consumi di energia elettrica, le due attività vengono considerate separatamente. Inoltre, nell'analisi dei requisiti di energia elettrica, il collegamento con i combustibili effettivamente utilizzati viene lasciato come un esercizio separato, poiché può variare in base alle caratteristiche della rete elettrica locale.

Non valutiamo qui le variazioni di exergia per la



Energy Use Breakdown by Type

Figura 1: Energia utilizzata in funzione il tasso di produzione per una linea automotive (Cortesia Toyota Motor Corporation) (2)

produzione dei materiali da lavorare in input, né la potenziale distruzione di exergia negli stessi durante il processo.

Per gli scopi di questo articolo, l'attenzione è rivolta soltanto ai requisiti di energia elettrica del processo di produzione. È conveniente pensare a un processo di produzione come composto da una serie di macchine e attrezzature necessarie per eseguire le fasi del processo. Qui viene considerata solo la macchina principale utilizzata per ciascun processo, ad esempio la fresatrice. Altre attrezzature ausiliarie che verrebbero utilizzate con il processo, come una sega per preparare il grezzo, potrebbero essere caratterizzate nello stesso modo utilizzato per la macchina o attrezzatura principale. Questi risultati possono poi essere combinati per fornire un quadro completo del processo.

I processi di produzione sono composti da una serie di fasi di lavorazione, che nel caso di elevati volumi sono solitamente automatizzate. Per alcuni processi, ciascuna di queste fasi può essere integrata in un'unica macchina. Ad esempio, una fresatrice moderna può includere una vasta gamma di funzioni, tra la movimentazione del pezzo, la lubrificazione, la rimozione dei trucioli, il cambio degli utensili e il sistema di misura e monitoraggio degli utensili, oltre alla funzione di base della macchina utensile, che è quella di asportare il truciolo. Il risultato è che queste funzioni aggiuntive possono spesso dominare la richiesta energetica. Si può avere un esempio osservando la Figura 1, che riguarda una linea di produzione automotive. In questo caso, il massimo requisito energetico per la lavorazione meccanica in senso stretto è solo il 14,8% del totale. A tassi di produzione inferiori, il contributo della lavorazione è ancora più piccolo. Altri processi mostrano questo stesso comportamento. In generale, c'è un requisito energetico significativo per avviare e mantenere l'attrezzatura in una posizione "pronta". Una volta in posizione "pronta", c'è un ulteriore requisito che è proporzionale alla quantità di materiale lavorato. Questa situazione è modellata nell'equazione 2:

$$P = P_0 + k \cdot Q \quad \text{Eq.2}$$

dove P è la potenza totale in kW, P₀ è la potenza nello stato inattivo in kW, Q è la portata di materiale rimosso in cm³/s (o Material Removal

Rate per la fresatura, MRR) e k è l'energia specifica in kJ/cm³ che, per la fresatura, sappiamo essere pari alla pressione di taglio ("L'energia in tornitura e fresatura", Macchine Utensili, novembre 2024).

L'exergia elettrica specifica per unità di materiale lavorato B_{elect}* in kJ/cm³, vale allora:

$$B_{\text{elect}} = \frac{P_0}{Q} + k \quad \text{Eq.3}$$

Si noti che qui l'energia elettrica è trattata come exergia pura, cioè come l'energia elettrica utilizzabile, da definizione di exergia, prodotta a partire dall'exergia contenuta nei combustibili usati nelle centrali elettriche. L'exergia elettrica è quindi inferiore all'exergia inizialmente messa in gioco con i combustibili. Come abbiamo detto però, in questo articolo ci concentriamo solo sui consumi di energia elettrica, tralasciando la sua produzione.

In generale, il termine P₀ proviene dalle caratteristiche dell'attrezzatura necessarie per supportare il processo, mentre k proviene dalla fisica del processo. Ad esempio, per un utensile da taglio, P₀ deriva dalla pompa del refrigerante, dalla pompa idraulica, dalla console del computer e da altre attrezzature in standby, mentre k è l'energia specifica di taglio, che è strettamente legata alla durezza e alle altre proprietà meccaniche del pezzo nonché alla meccanica del taglio. Per un processo termico, P₀ proviene dalla potenza necessaria per mantenere il forno alla temperatura corretta, mentre k è legato al calore incrementale necessario per aumentare la temperatura di un'unità di prodotto.

Le evidenze della relazione data dalle equazioni 2 e 3 sono mostrati per le operazioni di lavorazione nella Figura 1 e per le operazioni di stampaggio a iniezione nella Figura 2.

Osservazioni e conclusioni

Una conclusione importante da questa generalizzazione è che l'exergia specifica di un processo di produzione è una funzione fortemente dipendente dalla produttività. A differenza delle stime spesso effettuate nei software LCA, l'energia specifica del processo (exergia) non è costante e può variare notevolmente; infatti, è infinita quando l'attrezzatura è in standby (Q = 0). Sebbene l'attrezzatura in standby venga ov-

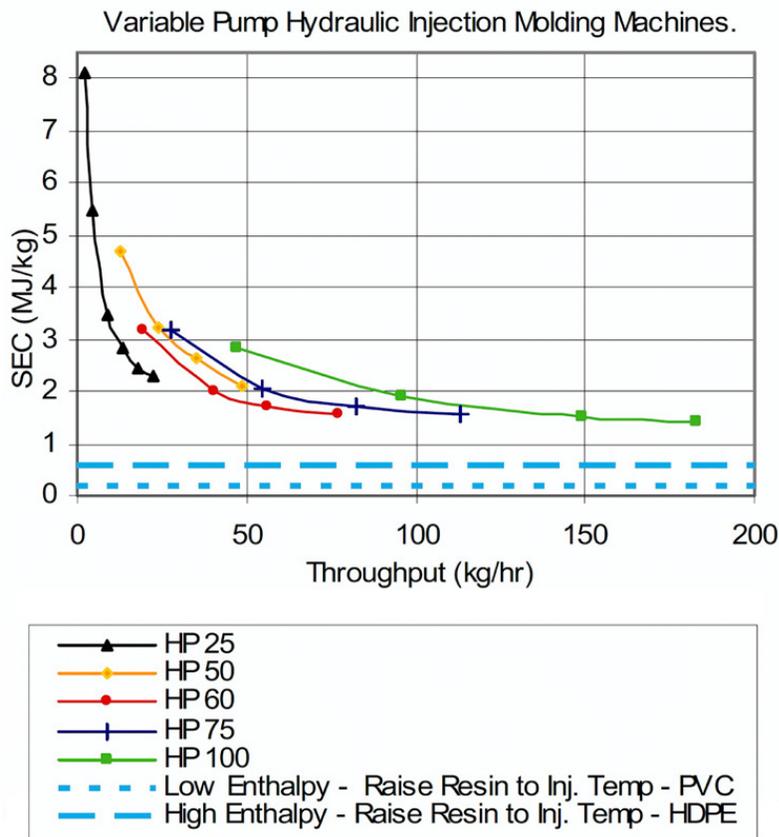


Figura 2: Energia utilizzata per diverse macchine per stampaggio a iniezione idrauliche in funzione della produttività (SEC: Specific Energy Consumption) (3)

viamente prima o poi spenta, operare a meno della piena capacità non è affatto raro. Molto spesso, infatti, si usano le macchine al di sotto del loro potenziale (potenza, numero di giri, portata, ecc.) per essere conservativi quando invece in questo modo si rende il processo meno competitivo dal punto di vista energetico. Una seconda osservazione è che, su un ampio intervallo di processi di produzione, il requisito totale di potenza per un dato processo varierà solo di uno o due ordini di grandezza, mentre l'intervallo di produttività (il tasso di asportazione di materiale per la fresatura, Q o MRR) può variare di 10 ordini di grandezza o più. In altre parole, gli standard e la convenienza nella distribuzione dell'energia hanno limitato la maggior parte delle attrezzature di produzione all'intervallo tra 5 e 50 kW. D'altra parte, le nuove tecnologie (e i bassi prezzi dell'energia del periodo pre-Covid) hanno spinto i processi di produzione verso una maggiore precisione e scale dimensionali più piccole. Molti di questi processi avanzati (v. l'elettroerosione, o Electrical Discharge Machining, EDM) hanno throughput molto più piccoli in termini di unità di materiale lavorato in un'unità di tempo. Il risultato è una progressione abbastanza ordinata dei processi di produzione verso tassi di lavorazione sempre più bassi e requisiti elettrici specifici sempre più elevati. Questa tendenza è mostrata nella Figura 3 per una quarantina di esempi tratti da una ventina di processi di produzione diversi. Questa figura è stata costruita a partire da una varietà di fonti elencate nell'articolo (1). Si noti che un singolo processo può aumentare la richiesta di energia operando a un tasso di lavorazione più basso. Questo accade, ad esempio, quando una fresatrice viene utilizzata per una finitura rispetto a una sgrossatura, o quando un processo CVD opera su 1 wafer invece di 250 wafer alla volta.

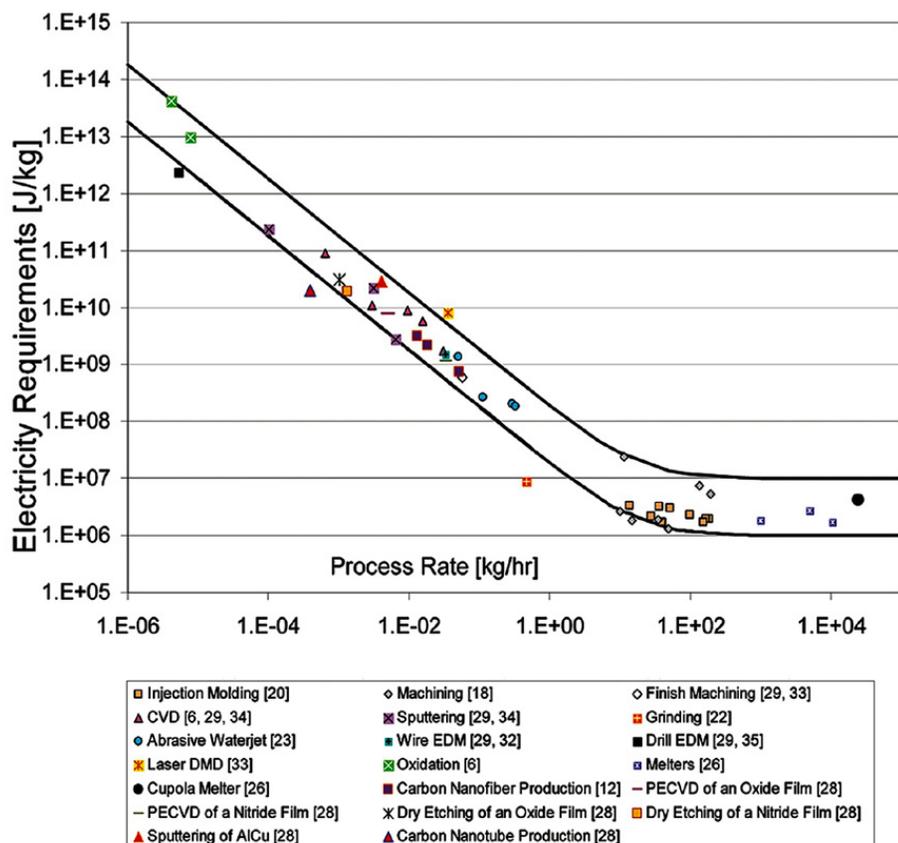


Figura 3. Lavoro sotto forma di elettricità utilizzato per unità di materiale lavorato per vari processi di produzione in funzione del tasso di lavorazione del materiale (6)



Una moderna fresatrice CNC durante la produzione di una grande ruota dentata

La Figura 3 e l'equazione 3 forniscono un semplice modello concettuale per stimare i requisiti di energia elettrica per un processo di produzione. Queste informazioni sono necessarie per l'analisi del ciclo di vita, o Life Cycle Assessment (LCA), e altri problemi di valutazione dell'impatto ambientale.

I dati mostrano che, in prima approssimazione, la caratteristica più importante di un processo è il suo tasso di produzione. Questo perché il requisito di energia elettrica specifica è spesso dominato dalle caratteristiche dell'attrezzatura di supporto piuttosto che dal meccanismo fisico effettivo del processo. Ciò suggerisce due strategie importanti per riprogettare i processi di lavorazione al fine di ridurre al minimo l'uso di energia. La prima è la riprogettazione dell'attrezzatura di supporto. Ad esempio, la riprogettazione delle macchine utensili e delle macchine per lo stampaggio a iniezione da idrauliche a completamente elettriche ha ridotto significativamente l'energia specifica (exergia) utilizzata da queste macchine.

Questo è illustrato nella Figura 4, dove sono riportati i dati per macchine per lo stampaggio a iniezione idrauliche e completamente elettriche

di dimensioni simili (3).

L'altra strategia consiste nell'aumentare il tasso con cui il meccanismo fisico può eseguire l'operazione desiderata. Questa strategia è illustrata dai significativi miglioramenti degli utensili da taglio nel corso dell'ultimo secolo, che hanno portato a riduzioni nei tempi di lavorazione di circa due ordini di grandezza (4, 5). Il risultato è un tasso di produttività maggiore e una richiesta energetica specifici più bassa. È importante notare che queste due strategie sono spesso interconnesse; l'aggiunta di attrezzature di supporto che consumano energia viene effettuata proprio perché consente una maggiore produttività.

Quello che possiamo notare nella Figura 3 è che i dati sono essenzialmente contenuti tra quattro

linee. La diagonale inferiore a 5 kW e la diagonale superiore a 50 kW racchiudono la maggior parte dei dati per i processi lavorazione avanzati e per i micro e nanoprocessi. Le linee orizzontali forniscono dei riferimenti utili per la costante fisica k.

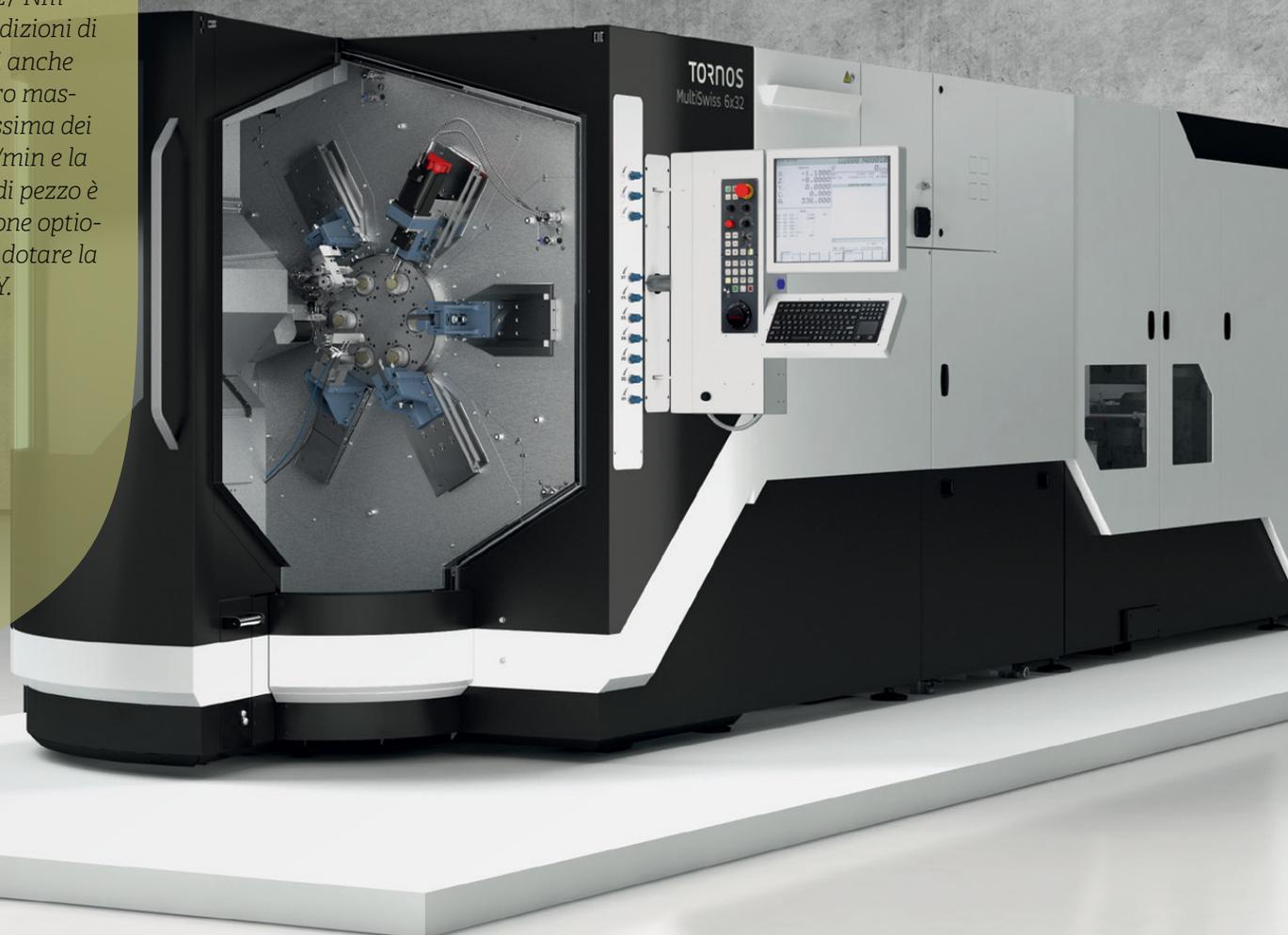
La linea inferiore (1 MJ/kg) è approssimativamente uguale al lavoro minimo (o energia minima) richiesto per fondere l'alluminio o il ferro. Questi due materiali, pur avendo caratteristiche fisiche e meccaniche diverse tra loro, richiedono infatti pressoché la stessa energia per essere fusi. Il ferro ha elevato punto di fusione (1538 °C rispetto a 660 °C dell'alluminio), ma l'alluminio ha elevato calore specifico rispetto al ferro (900 contro 450 J/(°C*kg)), mentre i calori latenti di fusione non sono così diversi (400 kJ/kg per l'alluminio contro 272 kJ/kg per il ferro). Il lavoro per deformare plasticamente questi metalli, come nella fresatura e nelle lavorazioni per asportazione di truciolo in generale, sarebbe appena al di sotto di questa linea. La linea orizzontale superiore approssima il lavoro necessario per vaporizzare questi metalli. In modo abbastanza sorprendente, quasi tutti i dati raccolti in (6) su una vasta gamma di proces-

TORNOS

MultiSwiss 6x32

La MultiSwiss 6x32 è realizzata sulla stessa base della MultiSwiss 8x26. Dotata di 6 mandrini indipendenti con cuscinetto idrostatico, è in grado di lavorare barre fino a 32 mm di diametro. Il motore da 11 Kw ha una coppia aumentata a 27 Nm (S6) che consente condizioni di lavorazione eccellenti anche con pezzi dal diametro massimo. La velocità massima dei mandrini è di 6000 g/min e la lunghezza massima di pezzo è di 65 mm. Nella versione optional, è possibile anche dotare la macchina di tre assi Y.

tornos.com



*32 mm, 27 Nm:
tutto ciò che è necessario
per i grandi diametri*

MultiSwiss 6x32

Figura 4: Confronto dell'uso di energia specifica per macchine per lo stampaggio a iniezione idrauliche e completamente elettriche di dimensioni simili in funzione della produttività del materiale (3)

si di produzione, alcuni dei quali con requisiti di potenza ben superiori a 50 kW, sono contenuti all'interno di queste quattro linee (6).

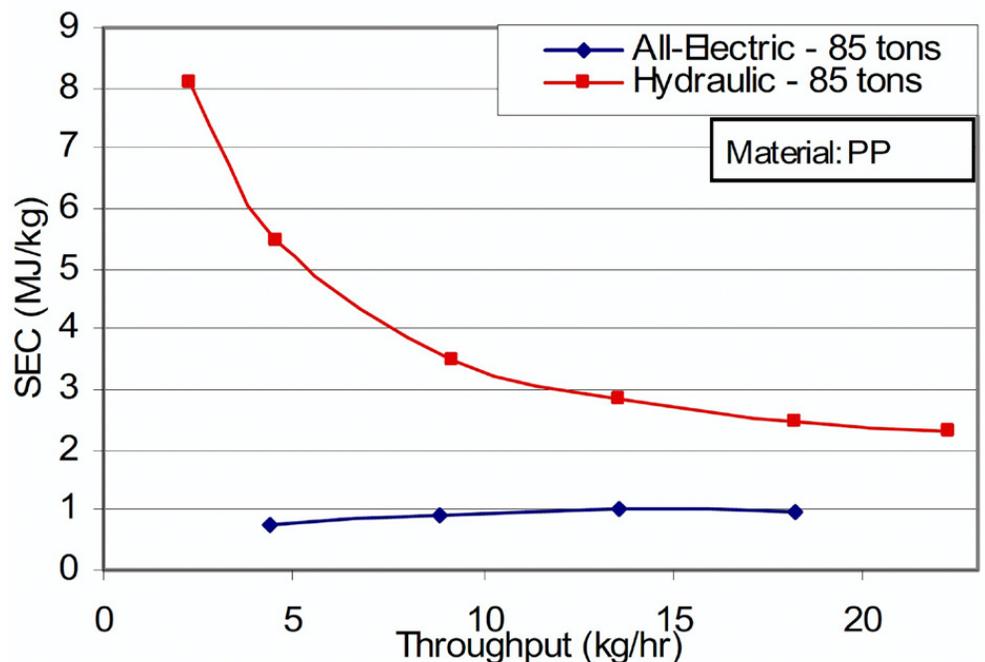
Nella "regione diagonale", il comportamento è descritto dal primo termine sul lato destro dell'equazione 3.

A circa 10 kg/h c'è una transizione verso un requisito di lavoro più costante, essenzialmente tra 1 e 10 MJ/kg. Questo gruppo include processi con requisiti di potenza molto elevati. Ad esempio, i forni a induzione elettrica utilizzano tra 0,5 e 5 MW di potenza, mentre il forno a cupola, o cubilotto, utilizza circa 28 MW di potenza. Si noti che il forno a cupola è alimentato dalla combustione del coke e non dall'elettricità; quindi, la potenza è stata calcolata sulla base della differenza di exergia tra gli input di combustibile e gli output dei residui in condizioni di temperatura e pressione ambiente.

Questa differenza include eventuali perdite di exergia durante il processo.

I processi nella parte inferiore, tra le linee orizzontali, sono i processi di produzione più vecchi e convenzionali, come il machining, lo stampaggio a iniezione e la fusione dei metalli per la colata. Nella parte superiore del diagramma vediamo processi più recenti, sviluppati recentemente, con valori molto alti di lavoro elettrico per unità di materiale lavorato. Un processo nella parte superiore (foratura per elettroerosione, EDM) può produrre canali di raffreddamento molto sottili e curvi nelle pale delle turbine tramite un processo di scarica elettrica. Fortunatamente, questi processi non trattano grandi quantità di materiale quindi rappresentano solo una piccola frazione dell'elettricità utilizzata nel settore manifatturiero.

I dati nella Figura 3 possono anche essere visti da un punto di vista storico. In generale, i processi nell'angolo in basso a destra della figura sono processi più vecchi e convenzionali, mentre quelli nell'angolo in alto a sinistra sono



processi più recenti di microelettronica e lavorazione avanzata. Questi processi più moderni possono lavorare con dimensioni più fini e scale più piccole, ma anche a tassi inferiori, con conseguenti requisiti di energia elettrica specifica molto elevati. In breve, la tendenza storica sembra essere quella verso processi di produzione più energetici.

I risultati mostrano che l'intensità di materiali ed energia utilizzati per unità di massa di materiale lavorato (misurata come energia specifica o come exergia) è aumentata di almeno 6 ordini di grandezza negli ultimi decenni. L'aumen-

to dell'intensità di utilizzo di materiali ed energia è stato principalmente una conseguenza dell'introduzione di nuovi processi di produzione, piuttosto che di cambiamenti nelle tecnologie tradizionali. Questo fenomeno è stato spinto dall'evoluzione verso dispositivi e caratteristiche di prodotto di piccole dimensioni e elevata precisione ed è stato reso possibile dalla stabilità e dal calo dei prezzi dei materiali e dell'energia durante questo periodo (6).

Recentemente questo trend verso la riduzione del costo dell'energia è venuto meno per cui vale la pena ridiscutere la questione. ■

Riferimenti bibliografici

- Gutowski, T., Dahmus, J., Thiriez, A., 2006. *Electrical energy requirements for manufacturing processes*. In: *13th CIRP International Conference on life cycle engineering*, pp. 623-627.
- Gutowski, T., Murphy, C., Allen, D., Bauer, D., Bras, B., Pivonka, T., Sheng, P., Sutherland, J., Thurston, D., Wolff, E., 2005. *Environmentally Benign Manufacturing: Observations from Japan, Europe and the United States*, *Journal of Cleaner Production*, 13: 1-17.
- Thiriez, A., *An Environmental Analysis of Injection Molding*, 2005, Massachusetts Institute of Technology, Project for M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Cambridge, MA, USA.
- Kalpakjian, S., Schmid, S.R., 2001. *Manufacturing Engineering and Technology, Fourth Edition*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Sandvik Coromant, 1996, *Modern Metal Cutting: A Practical Handbook*. Fair Lawn, NJ, USA.
- 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.