

Il calore trasferito all'utensile viene smaltito in funzione del materiale dell'utensile e del rivestimento. Il rivestimento dovrebbe fungere da barriera termica per impedire al calore di penetrare nell'utensile

Quando il truciolo scalda l'officina

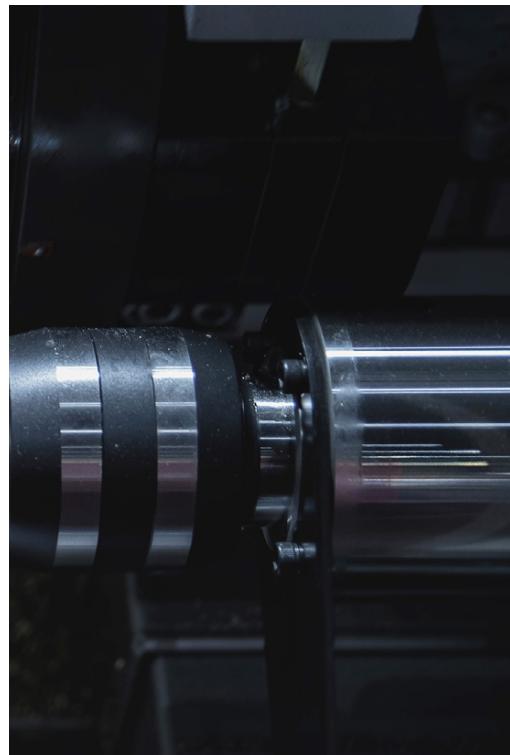
Come scoprire e sfruttare il calore perduto delle lavorazioni meccaniche

■ Massimiliano Annoni

I flusso di calore nel taglio dei metalli è fortemente influenzato dalla velocità di taglio. Inoltre, in generale, più alta è la velocità di taglio, più il calore sarà smaltito dal truciolo (Figura 1). Scegliere correttamente la velocità di taglio è quindi fondamentale per avere una si-

tuazione termica ottimale. La scelta però non è ovvia in quanto da un lato elevate velocità di taglio portano a una maggiore generazione di calore quindi a maggiori temperature. Per contro, con velocità di taglio elevate c'è un maggiore trasferimento di calore verso il truciolo, il

che produce meno calore e temperature inferiori nella zona di taglio. A velocità di taglio molto alte e in condizioni di stabilità della lavorazione si instaura una condizione di adiabaticità che permette lo smaltimento del calore quasi esclusivamente trami-



A velocità di taglio molto alte e in condizioni di stabilità della lavorazione si instaura una condizione di adiabaticità che permette lo smaltimento del calore quasi esclusivamente tramite il truciolo, con evidenti vantaggi in termini di usura utensile

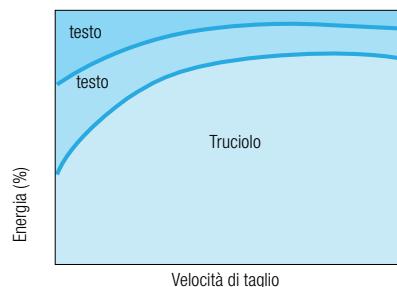
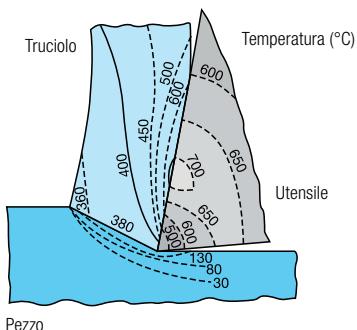


Figura 1. Influenza della velocità di taglio sulla distribuzione del calore in un processo di taglio dei metalli. Le temperature a sinistra sono un esempio tipico per tornitura generale di acciaio (Fonte: Seco (1))



te il truciolo, con evidenti vantaggi in termini di usura utensile.

Il calore trasferito all'utensile viene smaltito in funzione del materiale dell'utensile e del rivestimento. Il rivestimento dovrebbe fungere da barriera termica per impedire al calore di penetrare nell'utensile. Una volta entrato, il calore dovrebbe essere smaltito dal materiale base dell'utensile, grazie alla sua diffusività termica. Nelle zone dell'utensile dove le temperature sono molto alte, si ha l'insorgenza dell'usura dell'utensile. A causa del fatto che esistono anche zone dell'utensile a temperature inferiori, il gradiente di temperatura crea sforzi termici nella struttura del materiale dell'utensile, che possono produrre cricche termiche che lo indeboliscono e ne riducono la vita utile. Nel caso di materiali difficili da lavorare, come le leghe di Titanio e le leghe di Nickel, si formano le cosiddette ban-

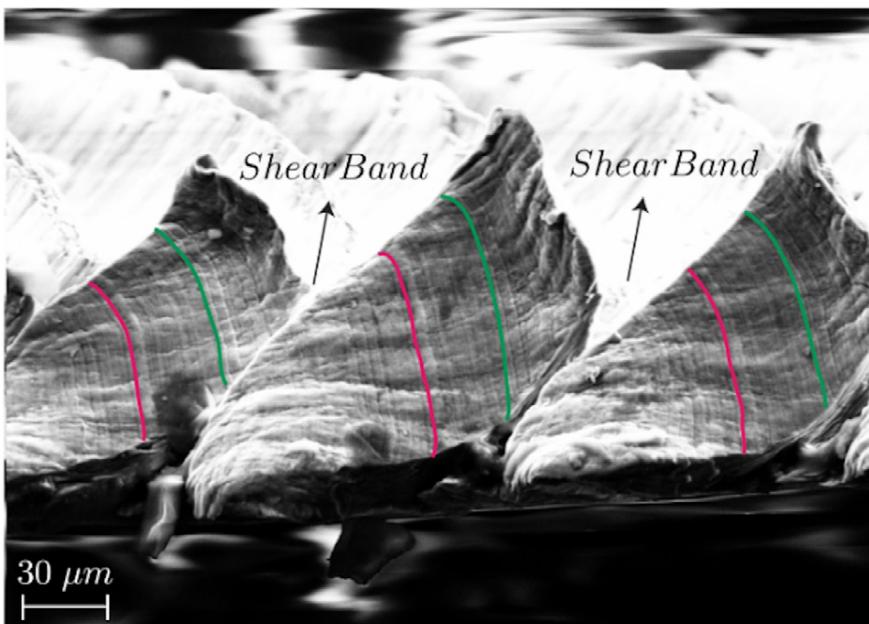
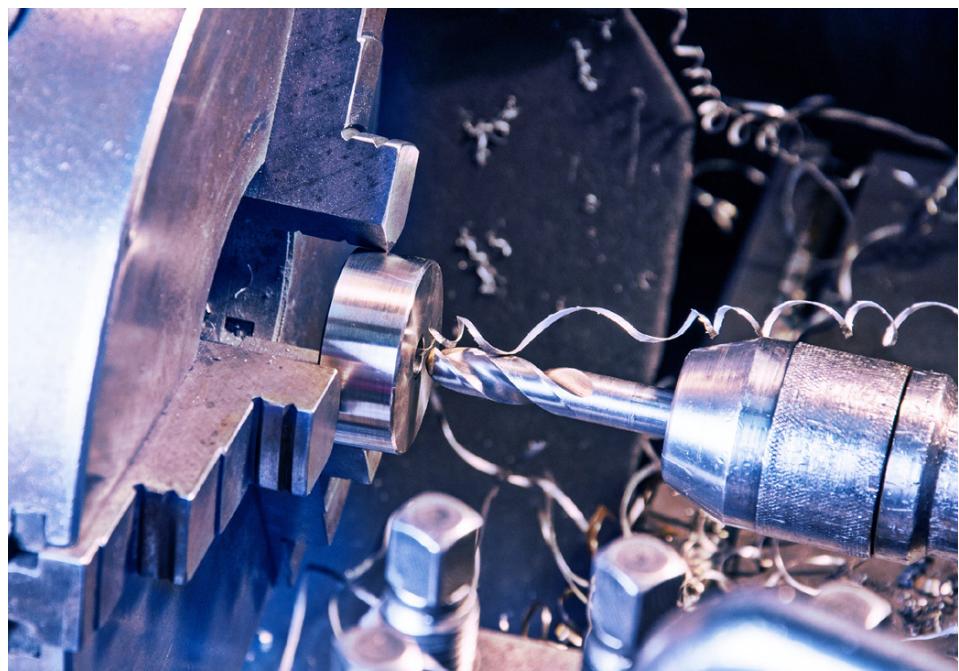


Figura 2. Truciolo segmentato nel taglio di titanio Ti-6Al-4V ($v_c = 60$ m/min) (2)

de di taglio adiabatiche (adiabatic shear band), che producono un truciolo segmentato a causa della concentrazione dello sforzo di taglio, che produce un grande innalzamento della temperatura con conseguente grande usura utensile. Supponiamo di aver risolto le problematiche descritte sopra e di trovarci in una condizione ottimale e stabile. Siamo quindi in grado di smaltire gran parte del calore tramite il truciolo. Dobbiamo a questo punto disporre di sistemi per convogliarlo efficacemente fuori dall'area di lavoro e di sistemi di lubrorefrigerazione in grado di sottrarre calore dalla zona di taglio e dalla macchina, pena la perdita di accuratezza sul pezzo a causa dell'elevata temperatura e, in presenza di grandi volumi di truciolo, a causa della loro rimacinazione durante la lavorazione.

Il calore sottratto dalla zona di taglio può essere una risorsa interessante da sfruttare per il recupero dell'energia. Per prima cosa, vediamo come possiamo calcolare l'energia disponibile sotto forma di calore a valle di una lavorazione per asportazione di truciolo.



Come quantificare il calore prodotto dall'asportazione di truciolo

Molti processi di lavorazione, come la formatura dei metalli e le lavorazioni per asportazione di truciolo, implicano grandi deformazioni a

elevate velocità (3). In tali condizioni, il processo termodinamico si discosta dallo stato isotermino e si avvicina all'adiabaticità, portando a variazioni ampie e talvolta molto rapide del campo di temperatura. L'analisi di questi processi deve quindi impiegare proprietà meccaniche dipen-



La principale fonte di incremento della temperatura, in assenza di calore esterno, deriva dalla dissipazione plastica, che è necessario stimare per una valutazione appropriata dell'addolcimento del materiale in applicazioni ad alta velocità di deformazione

denti dalla temperatura, nelle quali il softening termico del materiale deve essere considerato poiché le instabilità plastiche dinamiche, come le bande di taglio adiabatiche che si formano nel truciolo o il necking, sono note per essere dipendenti dalla temperatura.

La principale fonte di incremento della temperatura, in assenza di calore esterno, deriva dalla dissipazione plastica, che è necessario stimare per una valutazione appropriata dell'addolcimento del materiale in applicazioni ad alta velocità di deformazione. Diversi ricercatori, a partire da Tresca (1879), Farren e Taylor (1925) e Taylor (1934), hanno osservato che il lavoro plastico non viene interamente convertito in calore durante la deformazione dei metalli, poiché una parte di esso viene immagazzinata come incravamento. A seguito di questi contributi fondamentali, il coefficiente di Taylor-Quinney è stato definito come il rapporto tra il lavoro dissipato e quello plastico (nella sua forma integrale, β_{int}), oppure tra le potenze dissipata e plastica (nella sua forma differenziale, β_{diff}). Questi coefficienti vengono utilizzati per calcolare l'aumento di temperatura nella simulazione di processi dinamici. È importante notare che il fattore integrale, per definizione, non può superare il valore 1, restrizione che non si applica ai rapporti istantanei di potenza.

Diversi autori hanno misurato tali coefficienti in polimeri e metalli utilizzando varie tecniche sperimentali, come la termografia, termocoppe incorporate o rivelatori a infrarossi ad alta velocità. Per semplicità, si assume spesso che i due fattori β siano costanti, solitamente inferiori a 1, o uguali a 1 quando tutto il lavoro plastico viene convertito in calore nel materiale. Una volta determinati, essi possono essere impiegati in un modello per calcolare il lavoro termico in uscita come frazione della potenza plastica dissipata in ingresso.

Tuttavia, diversi autori hanno riportato una dipendenza funzionale di β_{int} dalla deformazione e/o dalla velocità di deformazione, fatto che può complicare in modo significativo la soluzione dell'equazione del calore accoppiata. Alcuni fenomeni, inoltre, possono intervenire e modificare il valore dei fattori β nello scorrimento delle dislocazioni, così come la ricristallizzazione dinamica può intervenire nella deformazione a alta velocità oppure possono avere luogo trasformazioni di fase, come la conversione di au-

stenite in martensite.

In tali casi, l'aumento di temperatura misurato comprende gli effetti delle trasformazioni di fase esotermiche durante le quali viene rilasciato calore latente.

Quando ciò accade, un semplice rapporto tra la potenza e il lavoro meccanici e termici, in cui questa sorgente di calore aggiuntiva è inclusa, può fornire valori effettivi di β_{int} e β_{diff} superiori a 1.

In generale, si possono trovare in letteratura lavori scientifici che, in funzione del materiale, usano coefficienti di Taylor-Quinney costanti e variabili da 0,85-0,95 per gli acciai strutturali o anche superiori per l'AISI 304 per tenere conto del calore latente della trasformazione di fase che avviene nella lavorazione.

Come abbiamo già scritto in alcuni articoli precedenti sull'energia nelle lavorazioni per asportazione di truciolo, di cui il primo è "L'energia in tornitura e fresatura", pubblicato su Macchine Utensili di novembre 2024, la pressione di taglio utilizzata per calcolare le forze di taglio possiede anche il significato di energia necessaria per asportare un'unità di volume del materiale lavorato. Ciò significa che possiamo stimare tale energia moltiplicando la pressione di taglio $k_{c,m}$ relativa al materiale target ai parametri di processo utilizzati (spessore del truciolo e materiale dell'utensile) e per il volume V da asportare nel passaggio dal pezzo grezzo al finito.

Una volta stimata l'energia necessaria per l'asportazione, possiamo ottenere il calore posseduto dal truciolo e dal fluido lubrorefrigerante come:

$$\text{Calore del truciolo} = 0,80 * 0,90 * k_{c,m} * V$$

Dove si tiene conto di un coefficiente di Taylor-Quinney del 90 %, a significare che il 90 % dell'energia necessaria per l'asportazione viene trasformata in calore, e di un altro fattore, pari all'80 %, per tenere conto che non tutto il calore generato rimane nel truciolo.

La macchina mette in gioco ulteriore calore derivante dai sistemi di raffreddamento del mandrino e degli assi e da inefficienze nella trasformazione dall'energia elettrica della rete all'energia meccanica usata per il taglio, ma questo calore viene già gestito dalla macchina e non è contenuto nel truciolo e nel fluido lubrorefrigerante.



Qual è l'impianto che permetterebbe di recuperare energia dal fluido lubrorefrigerante?

Ha senso usare un impianto di cogenerazione per recuperare il calore dalle macchine utensili?

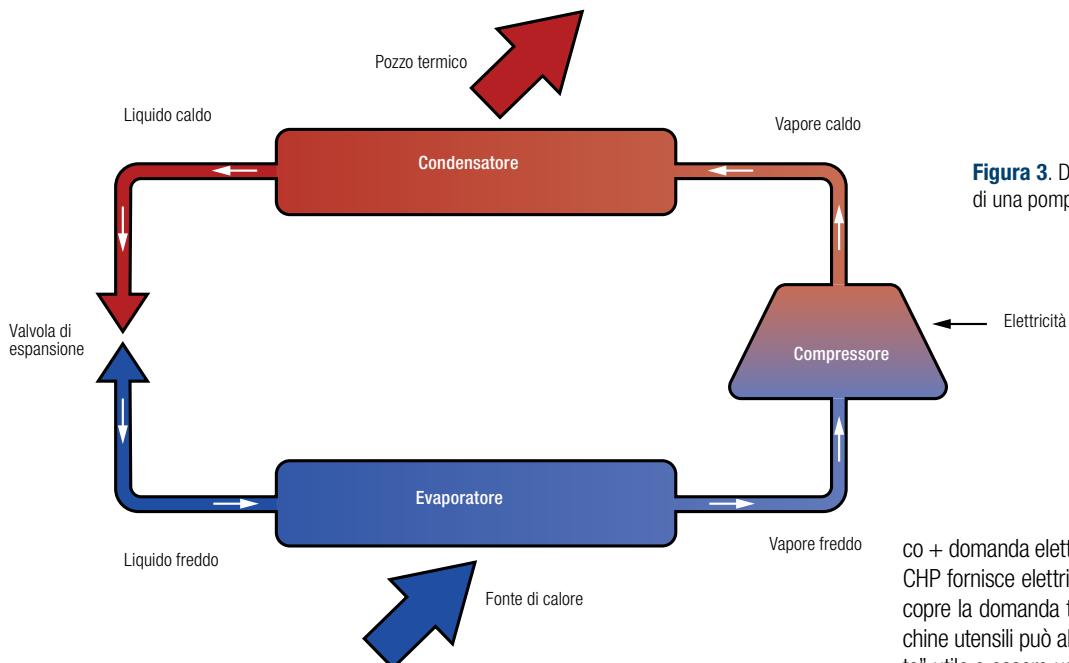
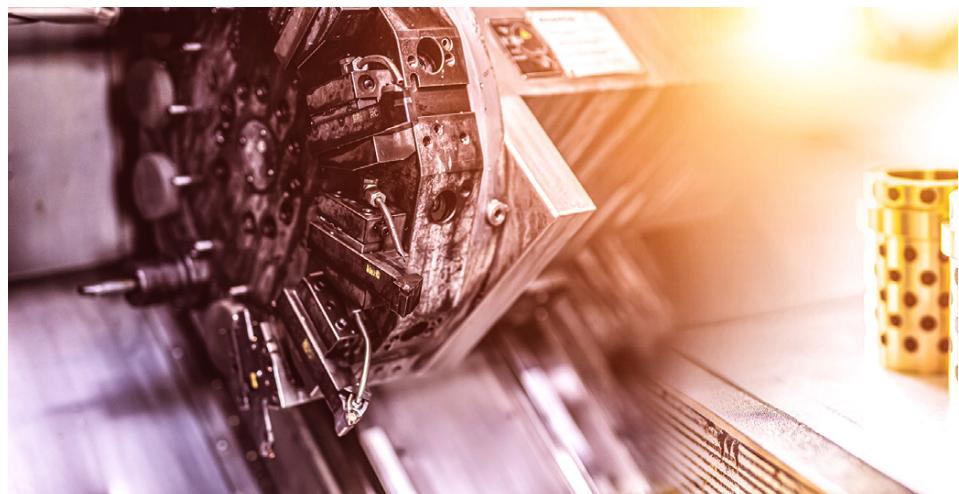


Figura 3. Diagramma di lavoro di una pompa di calore (4)

Come possiamo recuperare il calore dai trucioli e dal fluido lubrorefrigerante?

A questo punto sono lecite alcune domande. Qual è l'impianto che permetterebbe di recuperare energia dal fluido lubrorefrigerante? Ha senso usare un impianto di cogenerazione per recuperare il calore dalle macchine utensili? Di norma non ha molto senso installare una centrale di cogenerazione (CHP, Combined He-

at and Power) solo per recuperare il calore proveniente dalle macchine utensili, perché quel calore è tipicamente a bassa temperatura e intermittente.

Invece ha più senso valutare pompe di calore, scambiatori/accumuli, ORC (Organic Rankine Cycle) o sistemi integrati. Un impianto CHP può avere senso se lo si inserisce in un sistema integrato più grande (es. reparto con grande e continuo fabbisogno termi-

co + domanda elettrica elevata): in quel caso la CHP fornisce elettricità e il suo calore di scarto copre la domanda termica; il calore delle macchine utensili può allora essere un "supplemento" utile o essere usato per ridurre il carico sulla CHP o per alimentare un accumulo termico. È interessante analizzare le alternative più adatte per recuperare il calore dai trucioli e dal fluido lubrorefrigerante delle macchine utensili:

Scambiatori + accumulo termico: catenare il calore dal coolant in uno scambiatore acqua-acqua e immagazzinarlo in un serbatoio per uso su richiesta (riscaldare locali, ACS (acqua calda sanitaria), preriscaldato). Funziona bene con recuperi a bassa temperatura se la domanda è flessibile.

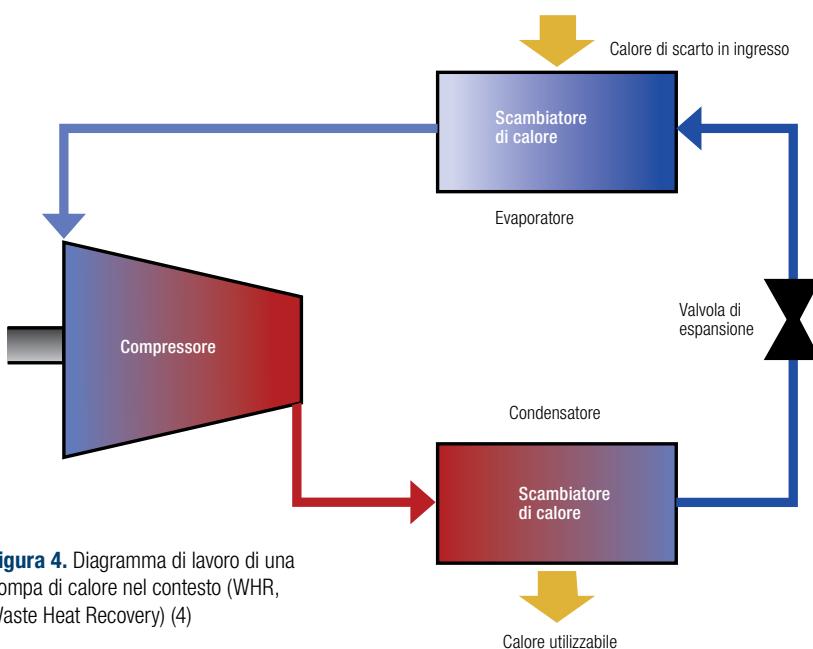
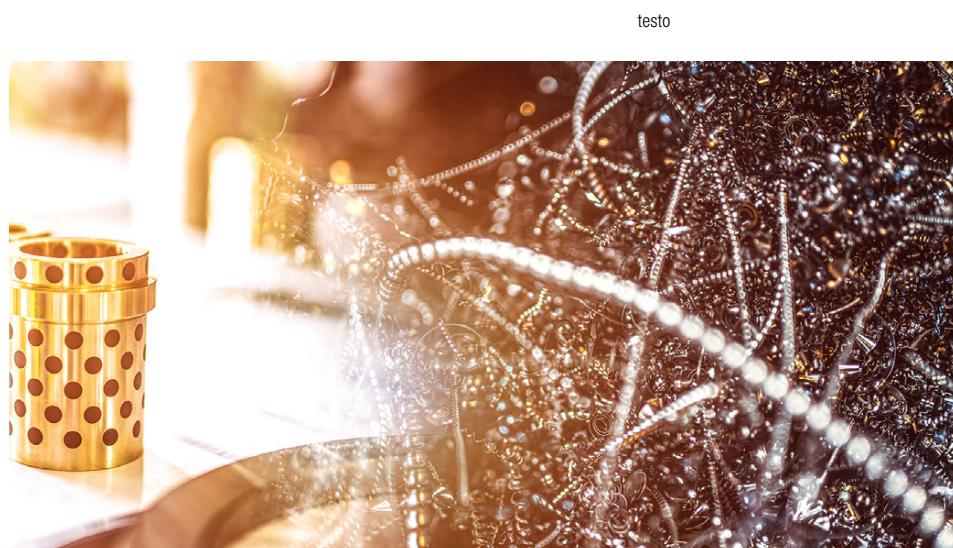


Figura 4. Diagramma di lavoro di una pompa di calore nel contesto (WHR, Waste Heat Recovery) (4)

Pompe di calore (HP): usano il calore a bassa temperatura come sorgente e lo "innalzano" a temperature utili per riscaldamento o processo; ottimo se il calore sorgente è debole ma continuo o accumulabile.

Lo stabilimento Sandvik di Katowice è un esempio di integrazione con heat-pump/chiller (v. seguente).

ORC (Organic Rankine Cycle): converte calore a bassa/medio-bassa temperatura in elettricità; utile se si hanno flussi termici co-

stanti a livelli utili per ORC (di solito $> \sim 60-80$ °C per installazioni commerciali, anche se le tecnologie spingono verso temperature minori). È più indicato quando il flusso termico è significativo e continuo.

Trigenerazione: per grandi stabilimenti con domanda di freddo, calore e elettricità integrati, si possono usare soluzioni combinate (CCHP, trigeneration, Combined Cooling, Heating and Power), ma richiedono una scala più elevata rispetto alle dimensioni di una PMI.

Pompe di calore

Una pompa di calore è un dispositivo termodinamico che preleva e trasferisce calore da una sorgente termica a un pozzo termico utilizzando una piccola quantità di energia (4). Le pompe di calore raccolgono calore dall'aria, dall'acqua o dal suolo e sono classificate come pompe di calore aria-aria, a sorgente d'acqua e geotermiche.

Le pompe di calore possono essere utilizzate come un'alternativa efficiente a forni e condizionatori d'aria per raffreddare o riscaldare un ambiente. I sistemi a pompa di calore possono anche essere impiegati come alternativa economica ed efficiente per il recupero di calore da varie sorgenti, al fine di migliorare l'efficienza energetica complessiva. In questa prospettiva, la pompa di calore è diventata un componente importante nel contesto del recupero di calore di scarto (WHR, Waste Heat Recovery) e dei processi ad alta efficienza energetica.

Una pompa di calore funziona secondo lo stesso principio dei frigoriferi e dei condizionatori d'aria; tuttavia, impiega un ciclo a refrigerante per produrre aria e/o acqua calda estraendo calore da una sorgente termica e trasferendolo a un evaporatore, che riscalda il refrigerante a bassa pressione. Quest'ultimo viene poi inviato a un compressore per produrre un gas ad alta pressione e temperatura, che può essere convogliato a uno scambiatore di calore (condensatore) (Figura 3).

Le pompe di calore, in particolare, sono adatte al recupero di calore di scarto a bassa temperatura (low-temperature WHR), poiché offrono la possibilità di "innalzare" il calore di scarto a una temperatura e qualità superiori. Ciò è stato dimostrato, ad esempio, in uno studio in cui, partendo da una sorgente di calore di 45-60 °C, la pompa di calore ha fornito quasi da 2,5 a 11 volte più energia utile rispetto ad altri sistemi di recupero del calore di scarto impiegati con lo stesso apporto termico.

Recuperando il calore di scarto che viene dissipato nell'ambiente e incrementandolo per mezzo di una pompa di calore, è possibile generare calore utile da impiegare direttamente in azienda, riducendo così l'assorbimento energetico e migliorando l'efficienza complessiva del sistema (Figura 4).

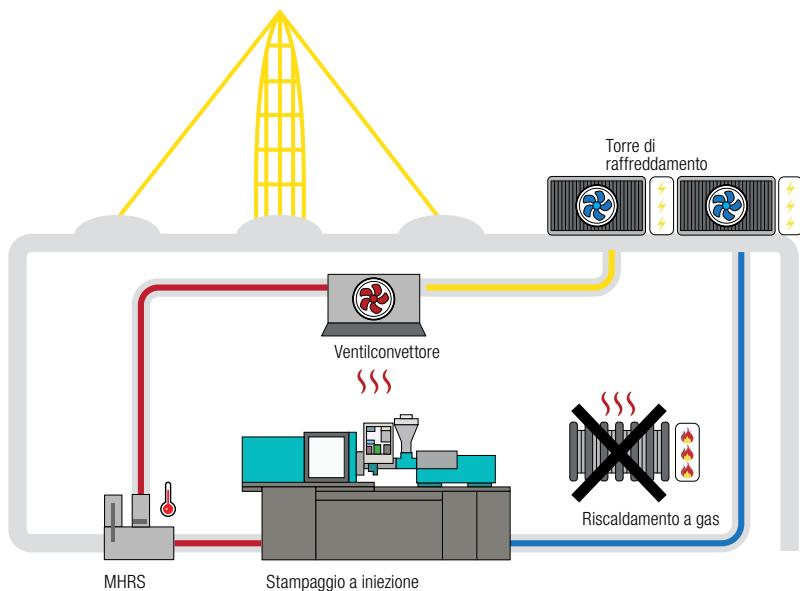


Figura 5. Il nuovo sistema di recupero del calore dalle macchine (Machine Heat Recovery System) di igus riscalda i capannoni industriali con il calore delle macchine senza alcuno scambiatore di calore (Fonte: igus GmbH)



Esempi di applicazioni di recupero energetico dai trucioli e dal lubrorefrigerante

In questa sezione sono presentati alcuni esempi di recupero energetico dai trucioli e dal fluido lubrorefrigerante che li contiene. Lo studio (5) ha sviluppato un sistema integrato che controlla la temperatura del fluido da taglio e simultaneamente recupera il calore dissipato durante la lavorazione meccanica, integrandosi direttamente nella macchina utensile. Il sistema sviluppato utilizza principalmente una pompa di calore. La sorgente di calore è l'acqua di raffreddamento e la sorgente verso la quale il calore viene trasferito è anch'essa acqua. Per questo, la pompa di calore è del tipo acqua-acqua in questo caso. L'acqua di raffreddamento viene pompata direttamente verso l'evaporatore del sistema e poi reimessa nell'area di lavoro dall'uscita del sistema, dopo essere stata raffreddata al livello appropriato.

Nello stabilimento **Sandvik Coromant** di Katowice (Polonia) (6) è stato installato un impianto centrale di trattamento dell'emulsione da la-

vorazione meccanica che serve anche per recuperare il calore e usarlo per la produzione di acqua calda e riscaldamento del sito.

Si stima il risparmio in 1.500 MWh all'anno di energia.

Sandvik Coromant ha collaborato con Energy Machines (7), che ha progettato il sistema di controllo, oltre a fornire e mettere in servizio un'unità combinata di refrigeratore e pompa di calore che aiuta a spostare energia termica dove serve, riducendo consumo elettrico e gas. Si è passati da un chiller stand-alone a un sistema centrale di raffreddamento che riutilizza calore di recupero da varie sorgenti: raffreddamento di processo, aria condizionata e aria compressa. Da quando il nuovo sistema energetico è stato implementato, i dati mostrano ottimi risultati. Il consumo di elettricità della fabbrica è diminuito del 24%, mentre l'uso di gas naturale è stato ridotto del 40%.

Energy Machines monitora la funzionalità dell'impianto e le prestazioni del sistema tramite un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) basato su cloud.

Quando il calore viene estratto dall'acqua calda e questa passa attraverso il ventilconvettore, la richiesta di raffreddamento della torre di raffreddamento diminuisce



L'azienda tedesca **igus** (8) produce polimeri ad alte prestazioni per applicazioni in movimento come sistemi per catene portacavi, cavi flessibili, cuscinetti a strisciamento, tecnologie per azionamenti a vite, robot e sensori. La maggior parte dei prodotti viene fabbricata tramite stampaggio a iniezione.

È proprio recuperando il calore dall'acqua di raffreddamento dalle macchine per injection moulding che igus riscalda uno dei propri stabilimenti industriali a Colonia-Lind dal 2023.

A seconda del fabbisogno di riscaldamento, il sistema sviluppato da igus (MHRs, Machine Heat Recovery System) dirige i flussi di acqua calda dal circuito di raffreddamento direttamente verso i ventilconvettori, garantendo al contempo che le macchine non si surriscaldino (Figura 5).

Quando il calore viene estratto dall'acqua calda e questa passa attraverso il ventilconvettore, la richiesta di raffreddamento della torre di raffreddamento diminuisce. Ciò offre il vantaggio che il precedente riscaldamento a gas viene eliminato e si utilizza meno energia elettrica

per il raffreddamento. Le temperature del circuito di raffreddamento possono essere regolate dal sistema.

L'MHRs non devia verso una costosa pompa di calore e non è necessario nemmeno uno scambiatore di calore, poiché questo comporterebbe perdite di temperatura. Il sistema può funzionare quindi alle basse temperature.

In questo caso non si tratta di utilizzare il calore contenuto nel liquido lubrorefrigerante di una lavorazione meccanica, ma del fluido di raffreddamento di una macchina. L'esempio appare comunque attinente e interessante per il settore dell'asportazione di truciolo.

Lo stesso vale per l'ultimo caso riportato. Nel 2012, **Fertigungstechnik Nord**, azienda del gruppo Nord Drivesystems situato a Gadebusch, Germania, ha sviluppato un concetto per il recupero del calore dalle macchine utensili che producono carter, alberi e ingranaggi (9). Ancora oggi, l'energia recuperata viene utilizzata per riscaldare circa 1.850 m² di aree di produzione, assemblaggio e uffici del sito. Il calore recuperato viene anche utilizzato per produrre acqua calda all'interno dell'impianto.

Il concetto di recupero del calore di Gadebusch è stato implementato utilizzando scambiatori di calore a piastre accoppiati ai vari sistemi di raffreddamento delle macchine.

I circuiti interni delle macchine sono collegati a un circuito esterno, che, essendo un circuito di acqua di raffreddamento, dissipà il calore in eccesso e lo convoglia in un sistema centrale di recupero del calore.

Dall'implementazione del sistema, Fertigungstechnik Nord ha collegato oltre 80 macchine, che sono interconnesse con il reparto di produzione e con il sistema di ventilazione dei capannoni.

All'interno del sistema di recupero, due pompe di calore generano acqua calda per il riscaldamento dell'impianto, mentre il calore viene dissipato dalle aree di produzione tramite tre dispositivi di raffreddamento.

Attualmente, la temperatura dei capannoni di produzione viene mantenuta a circa 28 °C, anche nel pieno dell'estate.

Il sistema funziona senza riscaldamento aggiuntivo quando la temperatura esterna è superiore a 0 °C. Se la temperatura scende sotto 0 °C, il sistema può utilizzare gas naturale per garantire una temperatura minima di 19 °C nei capannoni e negli uffici.

Attualmente, Fertigungstechnik Nord risparmia circa un terzo del precedente consumo di 583.000 kWh di energia da combustibili fossili, corrispondente a una riduzione delle emissioni di CO₂ di circa 117 tonnellate.■

Riferimenti bibliografici

1. *Applied Metal Cutting Physics – Best Practice*, Patrick De Vos, Seco
2. M. Fazlali, M. Ponga, X. Jin, *Analytical Modeling of Shear Localization in Orthogonal Cutting Processes*, *J. Manuf. Sci. Eng.* Feb 2022, 144(2): 021013
3. R. Zaera, J.A. Rodríguez-Martínez, D. Rittel, *On the Taylor-Quinney coefficient in dynamically phase transforming materials. Application to 304 stainless steel*, *International Journal of Plasticity*, 2013, 40, 185-201. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.08.003>
4. H. Jouhara, N. Khordehagh, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, S.A. Tassou, *Waste heat recovery technologies and applications*, *Thermal Science and Engineering Progress* 6 (2018) 268–289
5. O. Şahin, D. Karayel, *Development of an Original Integrated System for Heat Recovery from Coolant in the Machining Process and Investigation of Its Efficiency*, *Appl. Sci.* 2024, 14, 11499. <https://doi.org/10.3390/app142411499>
6. <https://www.annualreport.sandvik/en/2018/operations/responsibility/environment.html>, consultato il 12 ottobre 2025
7. <https://www.energymachines.com/post/sandvik-coromant-katowice-1>, consultato il 12 ottobre 2025
8. <https://press.igus.com/2023/04/21/waste-coolant-water-to-heat-factories/>, consultato il 12 ottobre 2025
9. <https://www.geartechnology.com/nord-develops-intelligent-heat-recovery-from-machine-tools>, consultato il 12 ottobre 2025