Le tensioni residue nelle avorazioni meceanicite

26 OTTOBRE 2024

Macchine Utensili

Questo articolo tratta un problema che preoccupa molte aziende che operano nel settore delle lavorazioni meccaniche: le tensioni residue

Massimiliano Annoni

ttraverso una schematizzazione del problema delle tensioni residue di origine termica che si generano durante il raffreddamento di un grezzo di fonderia in sabbia, vengono fornite alcune semplici equazioni in grado di cogliere la fisica del fenomeno. Sebbene la fonderia sia un caso particolare di lavorazione meccanica, la trattazione è generalizzabile ad altri processi in cui siano importanti fenomeni termici e meccanici. Per questo l'autore ritiene questa trattazione molto potente, in quanto capace di spiegare vari fenomeni legati alle tensioni residue e utile per fornire validi consigli per ridurne gli effetti.

In fonderia, il ritiro in fase solida, vale a dire la riduzione di dimensioni del grezzo che avviene a valle della sua completa solidificazione, genera un problema di tensioni termiche. Sebbene il grezzo si trovi ancora nella forma, semplifichiamo la trattazione considerando che essa ceda senza opporre resistenza quindi non possa essere considerata come una causa della generazione di tensioni nel grezzo, cosa che accadrebbe se invece la forma fosse in grado di resistere alla contrazione del grezzo.

La causa delle tensioni che consideriamo in questo articolo è soltanto la geometria delle feature del nostro componente.

Corpi con geometria diversa si raffreddano con velocità differenti quindi con contrazioni differenti istante per istante.

Prendiamo ad esempio la piastra con due asole riportata nella Figura 1 e scomponiamola idealmente nelle 5 feature a (2x), b (1x) e c (2x) (Figura 1).

Possiamo confrontare le velocità di raffreddamento delle feature a, b e c osservando che il calore smaltito da un corpo verso l'esterno è proporzionale a:

$$\Delta Q \propto S \cdot (T - T_{\rm A}) \cdot \Delta t$$



Figura 1: Piastra con due asole utile per schematizzare il fenomeno delle tensioni a caldo in fonderia, cioè le tensioni interne che si generano nel pezzo durante il raffreddamento

 $\Delta Q \propto S \cdot (T - T_{\rm A}) \cdot \Delta t$

con:

 ΔQ : Variazione di calore

 $\boldsymbol{\propto}$: Simbolo che rappresenta la proporzionalità diretta

- S: Superficie di scambio termico del corpo
- T: Temperatura del corpo
- TA: Temperatura ambiente

 $T_{\rm S}$: Temperatura di completa solidificazione del grezzo (solidus) (v. Figura 2). E' la temperatura iniziale nel processo di raffreddamento studiato in questo articolo

 Δt : Variazione di tempo

La variazione di calore però può essere anche modellata tramite l'effetto che ha sulla variazione di temperatura del corpo:

$$\Delta Q \propto m \cdot c_{\rm p} \cdot \Delta T = \rho \cdot V \cdot c_{\rm p} \cdot \Delta T$$

con:

- m: Massa del corpo
- $c_{\mathbf{p}}$: Calore specifico a pressione costante
- ΔT : Variazione di temperatura del corpo
- *P*: Densità del corpo
- V: Volume del corpo

Per la conservazione dell'energia, la variazione di calore del corpo "vista dall'esterno" (cioè tramite lo scambio di calore con l'esterno) deve essere uguale alla variazione di calore "vista dall'interno" (cioè in grado di produrre una variazione di temperatura del corpo), da cui, dividendo il secondo membro della seconda equazione per il secondo membro della prima, si ottiene:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \propto \frac{S}{V} \cdot (T - T_A) = \frac{1}{M} \cdot (T - T_A)$$

on:

 $M = \frac{V}{s}$: Modulo termico del corpo

in cui si considerano le caratteristiche fisiche del materiale (densità e calore specifico) come costanti.

Il primo membro di questa relazione è la variazione di temperatura nell'unità di tempo, cioè la velocità di raffreddamento (considerata positiva). Essa è proporzionale alla differenza tra la temperatura del corpo e la temperatura dell'ambiente divisa per il modulo termico M del corpo.

Il modulo termico ha una grande utilità nella descrizione dei fenomeni termici in quanto permette di modellare la capacità di un corpo di

smaltire il calore. Se il modulo termico di un corpo (o di una feature del nostro pezzo meccanico come, per esempio, una parete sottile) è elevato, significa che il corpo (o la feature) dispone di elevato volume rispetto alla superficie scambiante per cui tenderà a mantenere più a lungo la propria temperatura. Per esempio, si spiega perché sia una buona idea costruire un serbatoio sferico quando si voglia che il liquido in esso contenuto mantenga il più a lungo possibile la propria temperatura. La sfera infatti è il solido geometrico che possiede il massimo volume a parità di superficie quindi il massimo modulo termico.

Nel caso in esame, il modulo termico si trova a denominatore. Questo ci dice che più il corpo è in grado di mantenere la propria temperatura (modulo termico alto) più bassa sarà la sua velocità di raffreddamento.

Le feature a del nostro esempio hanno una sezione quadrata di lato H_{a} , mentre la feature b ha sezione rettangolare con lato lungo pari a H_{b} e lato corto pari a H_{a} , con H_{b} molto maggiore di H_{a} .

Possiamo quindi calcolare i moduli termici delle feature a e della feature b:



Figura 3: Allungamento delle feature a e b supposte libere di deformarsi termicamente in funzione della temperatura assunta durante il raffreddamento. La linea rossa rappresenta la lunghezza di equilibrio che le feature devono assumere essendo vincolate alla feature c di destra

$$M_{a} = \frac{V_{a}}{S_{a}} = \frac{H_{a}^{2} \cdot L}{4 \cdot L \cdot H_{a}} = \frac{H_{a}}{4}$$
$$M_{b} = \frac{V_{b}}{S_{b}} = \frac{H_{a} \cdot H_{b} \cdot L}{2 \cdot H_{a} \cdot L + 2 \cdot H_{b} \cdot L}$$
$$= \frac{H_{a} \cdot H_{b} \cdot L}{2 \cdot L \cdot (H_{a} + H_{b})} = \frac{H_{a} \cdot H_{b}}{2 \cdot (H_{a} + H_{b})}$$

Si noti che nel calcolo si trascurano le superfici di estremità delle feature a e b perché non scambiano calore con le feature c essendo alla medesima temperatura. La superficie di scambio termico delle feature è soltanto quella laterale, che si affaccia alla forma.

Per capire quale dei due moduli termici sia il maggiore, calcoliamo il rapporto:

$$\frac{M_{\rm b}}{M_{\rm a}} = \frac{H_{\rm a} \cdot H_{\rm b}}{2 \cdot (H_{\rm a} + H_{\rm b})} \cdot \frac{4}{H_{\rm a}} = \frac{2 \cdot H_{\rm b}}{(H_{\rm a} + H_{\rm b})} = \frac{2}{\left(\frac{H_{\rm a}}{H_{\rm b}} + 1\right)}$$

Dato che, per impostazione del problema, $\rm H_{_b}$ $>> \rm H_{_a},$ si ottiene:

$$\frac{M_{\rm b}}{M_{\rm a}} \cong 2$$

quindi $M_{b} >> M_{a}$. Il modulo termico di b, che è un corpo più massivo, è decisamente superiore dunque b si raffredda molto più lentamente di a, almeno per valori elevati di temperatura, cioè all'inizio del processo di raffreddamento.

Le feature c sono ancora più massive e, agli scopi di questa trattazione, hanno l'unico ruolo di determinare un vincolo di congruenza per le estremità delle feature a e b, che sono costrette a mantenere sempre la stessa lunghezza durante il raffreddamento. Vedremo come sia proprio questo vincolo a generare le tensioni residue.

Per il tipo di legge che lega la velocità di raffreddamento, il modulo termico e la differenza di temperatura tra la feature e l'ambiente, posto che $M_{_b} >> M_{_a}$, la legge di raffreddamento è di tipo esponenziale negativo (Figura 2).

Come si può osservare, le feature a sono sempre più fredde della feature b durante tutto il processo di raffreddamento, salvo che tutte le feature raggiungano la stessa temperatura ambiente asintotica, come è corretto aspettarsi.

Alla temperatura di solidus, le feature a si raffreddano più velocemente rispetto alla feature b.

Si può dimostrare che, oltre un certo valore di

28 OTTOBRE 2024

BERMI 500

PRO 2

BERMI-500

Con tecnologia all'avanguardia e oltre 50 anni di esperienza nel settore, garantiamo lavorazioni di precisione estrema, zero vibrazioni e finiture superficiali di qualità superiore.



Officine Meccaniche Bergamini srl Viale Italia, 8 - 41037 Mirandola (MO) - Italy Tel: 0535 20204 - Fax: 0535 23051 E-mail: info@bergamini.it www.bergamini.it

Rettificatrici BERMI 500

Precisione nei dettagli, eccellenza nel risultato

tempo t^{*}, la tendenza si inverte e la feature b si raffredda più velocemente delle feature a. Al tempo t^{*}, le due curve hanno la stessa tangente, essendo l'istante in cui le due velocità di raffreddamento sono uguali.

Ora, per semplicità, immaginiamo le feature a e b vincolate alla feature c di sinistra e libere di allungarsi a destra (Figura 3). L'allungamento assiale di a e b, se fossero libere, si potrebbe stimare come:

$$\Delta L_{a} = L_{TA} \cdot \alpha \cdot (T_{a} - T_{A})$$
$$\Delta L_{b} = L_{TA} \cdot \alpha \cdot (T_{b} - T_{A})$$

con:

 $\Delta L_{\rm a}$, $\Delta L_{\rm b}$: Variazione di lunghezza delle feature a e della feature b, supposte libere di deformarsi termicamente, rispetto alla lunghezza di temperatura ambiente $L_{\rm TA}$

 L_{TA} : Lunghezza che le feature a e b devono avere a temperatura ambiente, a raffreddamento avvenuto

 α : Coefficiente di dilatazione termica lineare $T_{\rm a}, T_{\rm b}$: Temperatura delle feature a e della feature b durante il raffreddamento

Dato che le temperature $T_a e T_b$ durante il raffreddamento sono diverse (v. Figura 2), si hanno lunghezze libere differenti. Le lunghezze libere tornano uguali quando il pezzo raggiunge la temperatura ambiente.

Dato però che le due feature a e la feature b sono vincolate alla feature c, per la congruenza troveranno istante per istante una configurazione di equilibrio.

Sia a sia b sono quindi costrette ad assumere la stessa lunghezza L durante il raffreddamento. La feature a, che, avendo un modulo termico inferiore, si raffredda e si accorcerebbe più velocemente se fosse libera, è costretta dal vincolo c a allungarsi di dL_a. Questo la sottopone a una sollecitazione di trazione durante il raffreddamento. Per contro, la feature b è costretta a accorciarsi di dL_b rispetto alla lunghezza che avrebbe se fosse libera. Per questo viene sottoposta a una sollecitazione di compressione durante il raffreddamento (Figura 4).

In ogni istante durante il raffreddamento, vale l'equazione:

$$dL_{\rm a} + dL_{\rm b} = \Delta L_{\rm b} - \Delta L_{\rm a}$$

Possono accadere tre casi, che vengono descritti nel seguito.



Figura 4: Deformazione permanente delle feature a dovuta alla trazione subita durante il raffreddamento







Figura 6: Stato tensionale e deformata a temperatura ambiente di una trave a T in cui la parete sottile verticale si sia snervata a trazione durante il raffreddamento

Caso 1: La sollecitazione nelle due feature a e b rimane in campo elastico

In questo caso si generano delle tensioni interne a partire dalla temperatura di solidus, vanno aumentando fino ad un massimo in t* (Figura 2), poi vanno diminuendo fino ad annullarsi a temperatura ambiente, cioè quando la differenza di temperatura tra le feature a e la feature b si annulla. A temperatura ambiente non si hanno effetti legati al fatto che durante il raffreddamento si sono generate delle tensioni interne. Il sistema "non ha memoria".

Caso 2: La sollecitazione in una delle feature a o b entra in campo plastico

La sollecitazione in una delle feature a o b (o in entrambe) entra in campo plastico.

Supponiamo che solo nelle feature a la sollecitazione sia maggiore del carico snervamento, a causa della loro minore sezione resistente rispetto alla feature b. Il materiale si deforma plasticamente, allungandosi di una quantità dL_a* (Figura 4).

A temperatura ambiente questa deformazione plastica rimane: se fossero libere, le feature a

Macchine Utensili



Figura 7: Consigli di buona progettazione di pezzi da fonderia per ridurre le tensioni residue (fonte: Tecnologia Meccanica, S. Kalpakjian, R. Schmidt, Ed. Pearson)

sarebbero più lunghe della feature b.

A causa dell'equilibrio delle forze, lo sforzo in valore assoluto di maggiore entità durante il raffreddamento si avrà in corrispondenza delle feature a, che, come già sottolineato, possiedono una minore sezione resistente rispetto alla feature b. In alcuni casi, sebbene il pezzo sia geometricamente simmetrico, potrebbe accadere che soltanto una delle feature a superi lo snervamento a causa di disomogeneità nella concentrazione di elementi, segregazione, ecc. Questo provoca una configurazione finale del pezzo non simmetrica secondo quanto vedremo tra poco in merito alle deformazioni a temperatura ambiente. Supponiamo ora che entrambe le feature a si siano snervate in egual misura. Ancora una volta, per la congruenza, le feature a devono essere lunghe tanto guanto la feature b. A temperatura ambiente, rimangono guindi delle tensioni residue dovute al ritiro (Figura 5). A temperatura ambiente, le feature a sono sollecitate a compressione mentre la feature b a trazione. Le sollecitazioni sono opposte rispetto a quanto osservato in temperatura.

Questo problema è critico nei pezzi lunghi che, quando possiedono velocità di raffreddamento fortemente differenti, possono mostrare rilevanti deflessioni a freddo, necessarie per scaricare parzialmente le tensioni residue, sotto il vincolo dell'equilibrio delle forze nel pezzo. Le tensioni interne, infatti, devono sempre essere "autoequilibrate", il che significa, nel caso in esame, che il prodotto tra la tensione di compressione delle feature a e la loro sezione resistente deve essere uguale in modulo al prodotto tra la tensione di trazione della feature b e la sua sezione resistente.

Nella Figura 6 vediamo l'esempio di una trave a T. Se progettiamo un pezzo caratterizzato da feature sottili (la parte verticale della sezione a T) in contatto con feature tozze (la parte orizzontale della sezione a T), e il pezzo è fortemente sollecitato termicamente, come accade in fonderia, rischiamo che la feature a sezione (e a modulo termico) inferiore si snervi a trazione durante il raffreddamento. Raggiunta la temperatura ambiente, questa feature non potrà raggiungere la stessa lunghezza della feature più tozza, non snervata, ma rimarrà più lunga e sollecitata a compressione. Per l'equilibrio, la feature tozza dovrà essere sollecitata a trazione. La trave a T risulterà per questo deformata con concavità verso l'alto.

In un caso come questo, potrebbe essere che il pezzo non debba essere scartato, ma il sovrametallo che possiede deve permettere una lavorazione di asportazione di materiale che riporti il pezzo in tolleranza. Attenzione però al fatto che se il pezzo non viene sottoposto a un trattamento termico di distensione, si rischia che, asportando il materiale, si raggiunga una nuova configurazione di equilibrio deformata che potrebbe essere indesiderata.

La modellazione e la quantificazione delle ten-

sioni residue dovute al ritiro in oggetti di forma più complessa è ovviamente più difficile e si deve ricorrere alla simulazione FEM.

Caso 3: La sollecitazione in una delle feature a o b supera il limite di rottura

In questo caso, una delle feature a arriva a rottura. Il pezzo è uno scarto.

In fonderia occorre fare attenzione a feature facenti parte dello stesso pezzo che presentano moduli termici eccessivamente differenti, in quanto i pezzi possono arrivare a rottura nella fase di rafred possono arrivare a tottura nella

La rottura è più probabile:

- nelle sezioni più sottili (minore resistenza)
- nelle sezioni sollecitate a trazione
- nelle zone a maggior gradiente termico (cioè in corrispondenza di spigoli e cambi bruschi di sezione)
- E' quindi necessario:
- non progettare feature massicce vicino a feature di spessore sottile
- prevedere una variazione "lenta" degli spessori per "distribuire" le sollecitazioni

In ogni caso, a valle della fonderia, il pezzo dovrebbe essere trattato termicamente per distenderlo.

Se così non fosse, le tensioni interne potrebbero generare una variazione della geometria quando il pezzo venisse lavorato successivamente asportando materiale.

Ad esempio, immaginiamo di dover asportare una delle due feature a in un pezzo affetto da tensioni residue come descritto nella Figura 5. A valle della rimozione della feature a superiore, il pezzo si presenta come nella Figura 8).

Il sistema di forze non è più in equilibrio: il pezzo si accorcia (viene a mancare infatti la "spinta" di una delle due feature a) e si inflette a causa del momento generato dalla trazione della feature b e dalla compressione della feature a. La concavità è verso l'alto.

Estensione a altri casi interessanti per il machining

La trattazione fin qui esposta riguarda il caso del raffreddamento di un grezzo da fonderia in sabbia. Con alcune considerazioni però, si può estendere a altre lavorazioni di interesse.

Per esempio, la colata in conchiglia per gravità o in pressione, dove la forma è metallica

(stampo), può essere considerata, ovviamente rimuovendo l'ipotesi secondo cui lo stampo non opponga resistenza al ritiro del grezzo. Si dovrà per questo rimuovere il grezzo molto velocemente dallo stampo, ma quanto accade alle tensioni interne a causa della geometria delle feature del pezzo rimane valido.

Anche il materiale non rappresenta un vincolo, per cui si può estendere la trattazione allo stampaggio a iniezione, dove si dovranno però considerare le proprietà della plastica anziché quelle del metallo.

Nei paragrafi precedenti abbiamo già accennato al ruolo delle lavorazioni di asportazione di materiale, come la fresatura, sul riequilibrio richiesto al pezzo a valle della rimozione delle tenzioni residue, che avviene a causa della rimozione del materiale in cui esse sono presenti. Questo fenomeno è assolutamente generale e questa trattazione ci insegna che quando asportiamo sovrametallo da un componente affetto da tensioni residue, ci dobbiamo aspettare una sua deformazione. Se non venissero prese opportune contromisure, il pezzo finito potrebbe uscire dalla tolleranza ammessa. L'unico modo per evitare il problema è effettuare un trattamento termico di distensione del pezzo prima di iniziare a lavorarlo. Non sempre però si opera in questo modo, soprattutto per ridurre i costi, e semilavorati tipicamente provenienti da laminazione non vengono trattati termicamente prima dell'asportazione di materiale.

Sebbene le tensioni prodotte dalla laminazione siano simmetriche nello spessore, la lavorazione quasi sempre non lo è, inoltre raramente avviene su entrambe le superfici del pezzo nell'ambito dello stesso bloccaggio, per cui ciò che si ottiene dopo una lavorazione in due fasi è un pezzo distorto. Questo fatto obbliga le aziende che devono produrre componenti a tolleranza stretta, magari di grandi dimensioni (per es. nel settore aerospace), a effettuare la lavorazione in molteplici piazzamenti in modo da compensare via via le distorsioni causate dalla lavorazione in una fase con la successiva. Ciò comporta costi elevati.

Un secondo caso che vale la pena di citare è quello di componenti prodotti mediante additive manufacturing di tipo termico (Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM), Direct Energy Deposition (DED) per citarne alcuni). E' buona norma depositare il materiale



Figura 8: Caso del pezzo rappresentato nella Figura 5 a cui venga asportata la feature a superiore



metallico su una piastra di spessore elevato (> 10 mm) per fare in modo che le tensioni termiche generate nel materiale dal processo non comportino una distorsione elevata del pezzo e della piastra stessa durante la deposizione. Si deve però fare attenzione alla rimozione del pezzo dalla piastra, fase che dovrebbe avvenire soltanto dopo opportuno trattamento di distensione, pena la deformazione del pezzo non appena rimosso dalla piastra a causa del rieguilibrio delle tensioni interne. Per questo motivo le macchine ibride additive + subtractive che possono depositare e poi rimuovere materiale nello stesso piazzamento dovrebbero includere anche un trattamento termico, altrimenti il pezzo finito rischia di uscire dalla tolleranza una volta separato dalla piastra, richiedendo ulteriori lavorazioni che rendono antieconomico il ciclo, se non impossibile il recupero del pezzo non più dotato di sovrametallo.

In altri casi, il problema non è la geometria finale del pezzo, ma è la presenza di tensioni residue di trazione in componenti come le ruote ferroviarie che, per normativa, sono sottoposte a un limite massimo consentito. Dobbiamo considerare che un componente come la ruota ferroviaria proviene da un ciclo di lavorazione meccanica (composto principalmente da forgiatura, laminazione e trattamento termico) che produce tensioni interne. A sua volta, la tornitura, che ha il ruolo di finire il componente, da una parte rimuove materiale, e con esso le tensioni interne ivi contenute, ma dall'altro introduce altre tensioni interne di tipo meccanico dipendenti dai parametri di processo. In questo caso, ottimizzando la lavorazione e scegliendo opportunamente utensili e strategie, si può fare in modo che il bilancio sia tale da soddisfare i requisiti.

Questo caso permette di sottolineare come non esistano solo le tensioni interne dovute alla storia termica del pezzo, ma anche le tensioni indotte dalla storia meccanica del componente vadano considerate. Dato che storia termica e storia meccanica si sovrappongono e intrecciano durante le lavorazioni incluse nel ciclo di lavorazione, non è affatto semplice governare le tensioni residue senza incorrere nell'aggravio di costi richiesto da un trattamento termico.

Per fortuna è possibile studiare questi fenomeni analiticamente e numericamente. La soluzione analitica permette di comprendere la fisica del problema ed è adatta a casi semplici, mentre per casi complessi viene richiesta un'analisi a elementi finiti.

Poi ci sono le strategie e i sistemi di bloccaggio dei pezzi nelle lavorazioni meccaniche a dare una mano alle aziende che debbano trattare questi casi. Recentemente si possono trovare sul mercato attrezzature sensorizzate in grado di rilevare forze e spostamenti durante la lavorazione. Mediante un'opportuna modellazione, si possono prendere decisioni su come lavorare il pezzo nelle fasi successive per sopperire alle deformazioni. Per questo è utile la collaborazione delle aziende con un centro di ricerca in grado di studiare la soluzione.