Tecnologia Meccanica e Qualità
16/07/2020

Nota: Il tema d'esame presenta diverse versioni che differiscono tra loro nei valori evidenziati in rosso. Questo documento si riferisce ad una delle versioni.

QUESITO DI FONDERIA

La Figura 1 mostra il grezzo di un pezzo in acciaio AISI 304 da produrre mediante processo fusorio in forma transitoria (per semplicità non sono riportati raggi di raccordo e angoli di sformo). Il grezzo è diviso in 5 geometrie elementari indicate nella vista laterale.

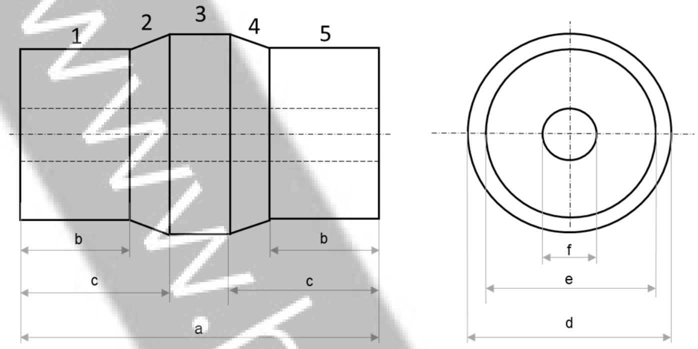

Figura 1 – Grezzo di fonderia

a. Calcolare i moduli termici delle geometrie elementari in cui è diviso il grezzo e determinare se i rapporti tra moduli termici siano adeguati. Dati geometrici: a = 340 mm, b = 115 mm, c = 145 mm, d = 165 mm, e = 145 mm, f = 60 mm.
b. Dopo alcune modifiche geometriche i moduli termici delle parti elementari in cui è diviso il grezzo risultano essere M1 = M5 = 16,5 mm, M2 = M4 = 21 mm e M3 = 24 mm, mentre il volume del getto è V = 5,063 dm^3; si valuti l'adeguatezza di una materozza cilindrica di diametro D = 150 mm e altezza pari a 1,1 volte il diametro, considerando un coefficiente di sicurezza del 10%. Coefficienti di Caine: a_c = 0,1, b_c = 0,03, c_c = 1.
c. La colata avviene in piano con H_m = 68 mm, coefficiente di perdite di carico c = 0,6 e rapporti A_C:A_D:A_A = 2:2:1. Nell'ipotesi di utilizzare due attacchi di sezione A = 700 mm^2 e considerando un volume del getto pari a V = 5,063 dm^3 e una materozza di volume V_m = 2,9 dm^3, si calcolino i tempi di riempimento e la corrispondente sezione del canale di colata.

QUESITO DI QUALITA'

Il direttore del reparto qualità di un impianto che produce pompe e valvole per il settore oil&gas è interessato a utilizzare una carta di controllo per monitorare la qualità superficiale (indice Ra) in lavorazioni di asportazione su componenti in ghisa. Si decide di effettuare misure individuali a campione con un intervallo di 1,5 ore tra una misura e la successiva, lavorando su 3 turni giornalieri da 8 ore ciascuno. Raccogliendo dati per 10 giorni consecutivi, vengono stimate le seguenti statistiche campionarie: $\overline{X} = 1{,}3\ \mu\text{m}$, $\overline{MR} = 0{,}3\ \mu\text{m}$. Si assuma che le misure siano indipendenti e identicamente distribuite secondo una normale.

a. Si calcolino i limiti di una carta di controllo I-MR corrispondenti ad un tempo medio tra falsi allarmi pari a 240 ore.

b. Assumendo di utilizzare i seguenti limiti di controllo per la carta I: LCI = $0{,}529\ \mu m$, LCS = $2{,}071\ \mu m$, qual è la probabilità di segnalare un aumento della media del processo di entità $\Delta = 0{,}25\ \mu m$ rispettivamente al primo e al secondo campione successivo alla variazione?
c. Utilizzando i limiti di controllo definiti al punto b), qual è il numero medio di campioni prima di segnalare un falso allarme?

QUESITO DI DEFORMAZIONE

L'altezza di un provino cilindrico in alluminio 6061-0 (K = 205 MPa e n = 0,2) di diametro $d_0 = 40$ mm e altezza iniziale $h_0 = 50$ mm deve essere ridotta mediante compressione fra stampi piani.

a. Determinare il diametro finale del provino nel caso lo si sottoponga ad una deformazione $\varepsilon = -0{,}16$.
b. Si decide di eseguire la deformazione in due passaggi indipendenti: un primo passaggio che porta il provino ad una altezza di 43 mm, seguito da un secondo passaggio che porta il provino alla sua altezza finale di 37 mm. Nell'ipotesi di attrito nullo, si determini la forza massima richiesta per ciascun passaggio ed il lavoro di deformazione complessivo necessario per portare il provino alla sua altezza finale.
c. Considerando un coefficiente di attrito pari a $\mu = 0{,}12$ e utilizzando la pressione media, si determini la forza massima necessaria per ridurre l'altezza del provino del 13% (ai fini dei calcoli geometrici si trascuri il fenomeno del barreling).
d. Supponendo che l'energia specifica per la compressione di un provino fino alla sua altezza finale sia $u =$ 0,15 J/mm^3, determinare il costo energetico per deformare 5000 provini ipotizzando un costo dell'energia di $0{,}1$ €/kWh.

SOLUZIONE

QUESITO DI FONDERIA

a. Moduli termici

Per simmetria, i moduli termici delle geometrie elementari 1 e 2 saranno uguali ai moduli delle geometrie 5 e 4, rispettivamente. Per ogni geometria elementare, i moduli termici si ricavano dal rapporto tra volume e area di scambio termico come segue.

Geometria elementare 1 (stesso risultato per geometria 5):

$$V_1 = \frac{\pi}{4}(e^2 - f^2)b = \frac{\pi}{4}(145^2 - 60^2)115 = 1573840 \text{ mm}^3$$

$$S_1 = \pi(e + f)b + \frac{\pi}{4}(e^2 - f^2) = \pi(145 + 60)115 + \frac{\pi}{4}(145^2 - 60^2) = 87749 \text{ mm}^2$$

$$M_1 = \frac{V_1}{S_1} = \frac{1573840}{87749} = 17{,}94 \text{ mm}$$

Geometria elementare 2 (stesso risultato per geometria 4):

Sia $L_2 = c - b = 30$ mm la lunghezza del tronco di cono,

$$V_2 = \frac{1}{12}\pi(d^2 + e^2 + de)L_2 - \frac{\pi}{4}(f^2)L_2 = \frac{1}{12}\pi(165^2 + 145^2 + 165 \cdot 145)30 - \frac{\pi}{4}(60^2)30 = 482038 \text{ mm}^3$$

$$S_2 = \frac{\pi}{2}(d + e)\sqrt{{L_2}^2 + \left(\frac{d}{2} - \frac{e}{2}\right)^2} + \pi f L_2 = \frac{\pi}{2}(165 + 145)\sqrt{30^2 + \left(\frac{165}{2} - \frac{145}{2}\right)^2} + \pi 60 \cdot 30 = 21053 \text{ mm}^2$$

$$M_2 = \frac{V_2}{S_2} = \frac{482038}{21053} = 22{,}90 \text{ mm}$$

Geometria elementare 3

Sia $L_3 = a - 2c = 50$ mm la lunghezza dell'elemento 3,

$$V_3 = L_3\frac{\pi}{4}(d^2 - f^2) = 50\frac{\pi}{4}(165^2 - 60^2) = 927752 \text{ mm}^3$$

$$S_3 = \pi(d + f)L_3 = \pi(165 + 60)50 = 35343 \text{ mm}^2$$

$$M_3 = \frac{V_3}{S_3} = \frac{927752}{35343} = 26{,}25 \text{ mm}$$

I rapporti tra moduli termici sono i seguenti:

$$\frac{M_2}{M_1} = 1{,}277$$

$$\frac{M_3}{M_2} = 1{,}146$$

I rapporti sono adeguati. La direzione di solidificazione va dall'esterno verso l'interno. La geometria elementare 3 è quella con modulo termico maggiore.

b. <u>Verifica del sistema di colata</u>

La materozza sarà posizionata in corrispondenza della geometria elementare 3, con diametro $D_m = 150$ mm e altezza $L_m = 1{,}1 \cdot 150 = 165$ mm.

Il modulo termico della materozza è

$$M_m = \frac{V_m}{S_m} = \frac{\frac{\pi}{4}D_m^2\, L_m}{\pi D_m\, L_m + \frac{\pi}{4}D_m^2} = \frac{\frac{\pi}{4}150^2\;\; 165}{\pi 150 \cdot 165 + \frac{\pi}{4}150^2} = 30{,}56 \text{ mm}$$

Da cui:

$$x = \frac{M_m}{M_3} = \frac{30{,}56}{24} = 1{,}273$$

Il valore limite $y_{c,adj}$ secondo il metodo di Caine con fattore di sicurezza η = 0,1 risulta:

$$y_{c,adj} = \left(\frac{a_c}{x - c_c} + b_c\right)(1+\eta) = \left(\frac{0{,}1}{1{,}273 - 1} + 0{,}03\right)(1 + 0{,}1) = 0{,}396$$

Il valore di y è:

$$y = \frac{V_m}{V} = \frac{2915791}{5063000} = 0{,}576 > y_{c,adj}$$

La materozza è adeguata.

c. <u>Tempi di riempimento e sezioni dei canali di colata e distribuzione</u>

La velocità di efflusso in corrispondenza della sezione di strizione è calcolabile come segue:

$$v = c\sqrt{2gH_m} = 0{,}6\sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot \frac{68}{1000}} = 0{,}693 \text{ m/s}$$

Utilizzando due attacchi la cui area è A = 700 mm^2, il tempo di riempimento risulta pari a:

$$t = \frac{5063000+2900000}{2 \cdot 700 \cdot 0{,}693 \cdot 1000} = 8{,}21 \text{ s}$$

Essendo A_C:A_D:A_A = 2:2:1, i canali di colata e distribuzione hanno sezione pari a:

$$A_C = A_D = 2 \cdot 2\text{A} = 2 \cdot 2 \cdot 700 = 2800 \text{ mm}^2$$

QUESITO DI QUALITA'

a. <u>Limiti di controllo della carta I-MR</u>

Dati $\overline{X} = 1{,}3$ µm, $\overline{MR} = 0{,}3$ µm e noto che le misure di rugosità sono indipendenti e identicamente distribuite secondo una normale, i limiti della carta I-MR si possono calcolare come segue:

Carta di controllo I: $LC_I^S = \overline{X} \pm K\,\frac{\overline{MR}}{d_{2(2)}}$

Carta di controllo MR: $LC_I^S = \overline{MR} \pm \frac{Kd_3(2)}{d_2(2)}\overline{MR}$

Da tabella: $d_2(2) = 1{,}128$ e $d_3(2) = 0{,}853$.

Volendo progettare la carta di controllo con un tempo medio tra falsi allarmi pari a T = 240 ore, ed essendo $\Delta T = 1{,}5$ ore il tempo tra una misura e la successiva su 3 turni da 8 ore, si ha:

$$ATS = \Delta T \cdot ARL(H_0) = 240 \text{ ore}$$

Da cui:

$$ARL(H_0) = \frac{ATS}{\Delta T} = \frac{240}{1{,}5} = 160$$

$$\alpha = \frac{1}{ARL(H_0)} = \frac{1}{160} = 0{,}00625$$

Dato $(1 - \alpha/2) = 0{,}99688$, da tabella si ricava (per approssimazione al valore più vicino) $K = z_{\alpha/2} = 2{,}73$.
I limiti di controllo risultati sono:

Carta di controllo I: $LCI = 1{,}3 - 2{,}73\frac{0{,}3}{1{,}128} = 0{,}574\ \mu\text{m}$, $LCS = 1{,}3 + 2{,}73\frac{0{,}3}{1{,}128} = 2{,}026\ \mu\text{m}$

Carta di controllo MR: $LCI = \max\left(0; 0{,}3 - \frac{2{,}73 \cdot 0{,}853}{1{,}128}0{,}3\right) = 0$, $LCS = 0{,}3 + \frac{2{,}73 \cdot 0{,}853}{1{,}128}0{,}3 = 0{,}919\ \mu\text{m}$

b. <u>Probabilità di segnalare un aumento della media al primo e al secondo campione successivo allo spostamento</u>

La probabilità di segnalare uno spostamento al primo e al secondo campione successivo allo spostamento è rispettivamente $1 - \beta$ e $\beta(1 - \beta)$. Dati LCI = $0{,}529\ \mu\text{m}$, LCS = $2{,}071\ \mu\text{m}$ e $\Delta = 0{,}25\ \mu\text{m}$, l'errore di secondo tipo si ricava come segue:

$$\beta(\Delta) = \Phi\left(\frac{LCS - (\hat{\mu} + \Delta)}{\hat{\sigma}}\right) - \Phi\left(\frac{LCI - (\hat{\mu} + \Delta)}{\hat{\sigma}}\right)$$

Dove $\hat{\mu} = \bar{X} = 1{,}3\ \mu\text{m}$ e $\hat{\sigma} = \frac{\overline{MR}}{d_2(2)} = \frac{0{,}3}{1{,}128} = 0{,}266\ \mu\text{m}$.
Da cui:

$$\beta(\Delta) = \Phi\left(\frac{2{,}071 - (1{,}3 + 0{,}25)}{0{,}266}\right) - \Phi\left(\frac{0{,}529 - (1{,}3 + 0{,}25)}{0{,}266}\right) =$$
$$= \Phi(1{,}96) - \left(1 - \Phi(3{,}84)\right) = 0{,}97494 \text{ (da tabella)}$$

La probabilità di segnalare lo spostamento al primo campione è $1 - \beta = 1 - 0{,}97494 = 0{,}02506$.
La probabilità di segnalare lo spostamento al secondo campione è $\beta(1 - \beta) = 0{,}97494(1 - 0{,}97494) = 0{,}02443$.

c. <u>Numero medio di campioni prima di un falso allarme</u>

Il numero medio di campioni prima di un falso allarme è $ARL(H_0) = \frac{1}{\alpha}$, dove:

$$\alpha = \Phi\left(\frac{LCI - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) + 1 - \Phi\left(\frac{LCS - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) =$$

$$= \Phi\left(\frac{0{,}529 - 1{,}3}{0{,}266}\right) + 1 - \Phi\left(\frac{2{,}071 - 1{,}3}{0{,}266}\right) =$$

$$= 1 - \Phi(2,9) + 1 - \Phi(2,9) = 0,00374 \text{ (da tabella)}$$

Da cui: $ARL(H_0) = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{0,00374} = 267,38$

QUESITO DI DEFORMAZIONE

a. Diametro finale

Per la conservazione del volume, si ha:

$$V_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} h_0 = V_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} h_1$$

L'altezza finale è data da:

$$h_f = h_0 e^{\varepsilon} = 50 \cdot e^{-0,16} = 42,61 \text{ mm}$$

Da cui:

$$d_f = \sqrt{\frac{h_0}{h_f} d_0^2} = \sqrt{\frac{50}{42,61} 40^2} = 43,33 \text{ mm}$$

b. Forze nei due passaggi e lavoro totale

Le tensioni di flusso corrispondenti ai due passaggi sono:

$$\sigma_1 = k\varepsilon_{0-1}^n$$
$$\sigma_2 = k\varepsilon_{tot}^n$$

Dove:

$$\varepsilon_{0-1} = \ln\left(\frac{h_1}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{43}{50}\right) = -0,15$$
$$\varepsilon_{TOT} = \varepsilon_{0-2} = \ln\left(\frac{37}{50}\right) = -0,30$$

Da cui:

$$\sigma_1 = k\varepsilon_{0-1}^n = 205 \cdot (-0,15)^{0,2} = -140,43 \text{ MPa}$$
$$\sigma_2 = k\varepsilon_{tot}^n = 205 \cdot (-0,30)^{0,2} = -161,25 \text{ MPa}$$

Le forze corrispondenti sono date da:

$$F_1 = \sigma_1 A_1$$
$$F_2 = \sigma_2 A_2$$

Dove:

$$A_1 = \frac{V}{h_1} \text{ e } A_2 = \frac{V}{h_2},$$

Da cui:

$$F_1 = \sigma_1 \frac{\frac{\pi d_0^2}{4} h_0}{h_1} = -140,43 \frac{\frac{\pi 40^2}{4} 50}{43} = -205191 \text{ N}$$

$$F_2 = \sigma_2 \frac{\frac{\pi d_0^2}{4} h_0}{h_2} = -161{,}25 \frac{\frac{\pi 40^2}{4} 50}{37} = -273827 \text{ N}$$

L'energia specifica è data da:

$$u = \left| \frac{k \varepsilon_{tot}^{n+1}}{n+1} \right| = \left| \frac{205 \cdot (-0{,}30)^{0{,}2+1}}{0{,}2+1} \right| \cdot \frac{1}{1000} = 0{,}0405 \text{ J/mm}^3$$

Il lavoro necessario per la deformazione è:

$$L = uV = 0{,}0405 \cdot \frac{\pi 40^2}{4} 50 = 2542{,}23 \text{ J}$$

c. <u>Forza massima</u>

Una riduzione di altezza del 13% corrisponde ad un'altezza finale $h_f = h_0(1 - 0{,}13) = 43{,}5$ mm. Per la conservazione del volume, area finale e diametro finale risultano:

$$A_f = \frac{V}{h_f} = \frac{\frac{\pi 40^2}{4} 50}{43{,}5} = 1444{,}4 \text{ mm}^2 \text{ e } D_f = \sqrt{\frac{4A_f}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1444{,}4}{\pi}} = 42{,}88 \text{ mm}$$

Utilizzando la pressione media, la forza massima si può calcolare come segue:

$$F = P_{AV} A_f = Y_f \left(1 + \frac{\mu D_f}{3 h_f}\right) A_f$$

Dove:

$$Y_f = k \varepsilon^n = k \left(\ln \left(\frac{h_f}{h_0} \right) \right)^n = 205 \left(\ln \left(\frac{43{,}5}{50} \right) \right)^{0{,}2} = -138{,}20 \text{ MPa}$$

Da cui:

$$F = Y_f \left(1 + \frac{\mu D_f}{3 h_f}\right) A_f = -138{,}2 \left(1 + \frac{0{,}12 \cdot 42{,}88}{3 \cdot 43{,}5}\right) 1444{,}4 = -207495 \text{ N}$$

d. <u>Costo energetico</u>

Sia $n = 5000$, il costo energetico vale:

$$C_E = n \cdot u \cdot V \cdot c_{ele}$$

Sapendo che $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$:

$$C_E = n \cdot u \cdot V \cdot c_{ele} = 5000 \cdot 0{,}15 \cdot \frac{\pi 40^2}{4} 50 \cdot \frac{0{,}1}{3600 \cdot 1000} = 1{,}31 \text{ €}$$