

# Processi di deformazione di volume

**Introduzione**

**Forgiatura**

Laminazione

Estrusione

Trafilatura

Rastrematura

# Introduzione

- I processi di formatura per deformazione si suddividono in base a temperatura, dimensioni e forma del pezzo e tipo di deformazione.
- Per temperatura si suddividono in: deformazione a freddo, a media temperatura e alta temperatura (a caldo).
- Per tipo di operazione si suddividono in lavorazione primaria (producono il semilavorato dal lingotto) e secondaria (portano al pezzo nella forma finale).
- Recentemente vengono classificati in base alla forma e dimensioni del pezzo:
  - Deformazioni di volume (bulk deformation)
  - Formatura della lamiera (sheet forming)

# Forgiatura

- Processo molto antico (5000 a. C.)
- Si fabbricano pezzi meccanici o per macchinari che richiedono alta resistenza meccanica (alberi motore, dischi turbine, ingranaggi, cerchi, utensili, bulloni e dadi.....)
- La forgiatura viene effettuata:
  - a freddo ( $T/T_m < 0.3$ ),  $T_m$  è la temperatura di fusione
  - a media temperatura ( $0.3 < T/T_m < 0.5$ )
  - ad alta temperatura ( $T/T_m > 0.6$ )
- Tre tipi di forgiatura:
  - open die, impression die, closed die

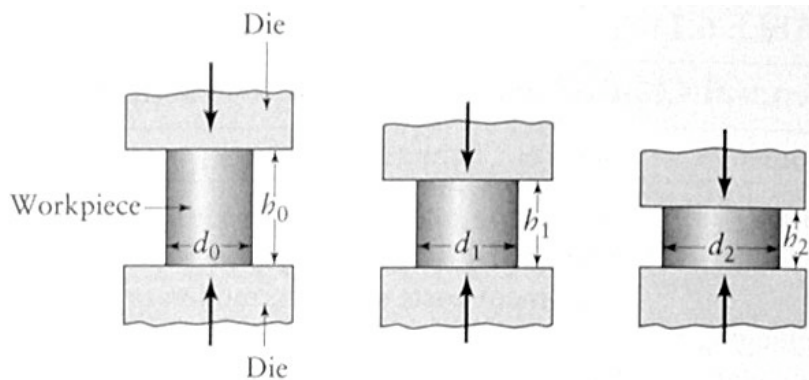
# Forgiatura a stampo aperto (open die)

- E' un processo di formatura per deformazione in compressione
- Nel caso di deformazione omogenea, per la conservazione di volume:

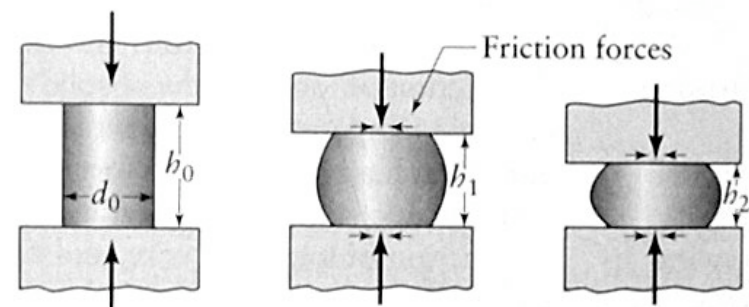
$$\text{Riduzione in altezza} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100\%$$

$$e_1 = \frac{h_0 - h_1}{h_0}$$

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right)$$



Deformazione ideale senza attrito



Deformazione reale con attrito

# Forgiatura a stampo aperto ideale

- La velocità di deformazione si calcola come ( $v$  = velocità piastre della pressa):

$$\dot{\epsilon}_1 = -\frac{v}{h_0} \quad \dot{\epsilon}_1 = -\frac{v}{h_1}$$

- Calcoliamo la forza applicata: la forza ad un'altezza  $h_1$  è pari a:

$$F = YA_1 \quad A_1 = \frac{A_0 h_0}{h_1}$$

- Se abbiamo indurimento per deformazione:  $F = Y_f A_1$

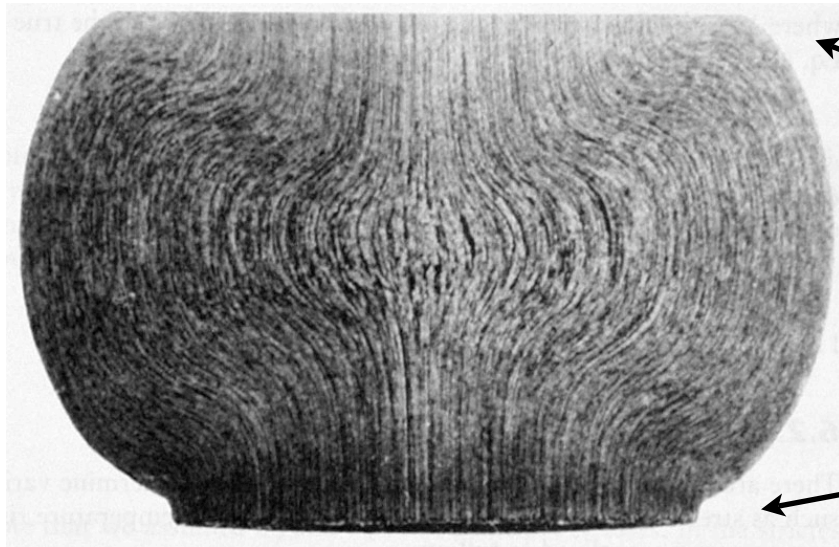
- l'energia per volume:

$$u = \frac{K \epsilon_1^{n+1}}{n+1} = \bar{Y} \epsilon_1$$

- quindi se  $Y_f$  è il flusso di sforzo e  $\bar{Y}$  quello medio, allora il lavoro di deformazione diventa:

$$Lavoro = V \frac{K \epsilon_1^{n+1}}{n+1}$$

# Forgiatura a stampo aperto, reale



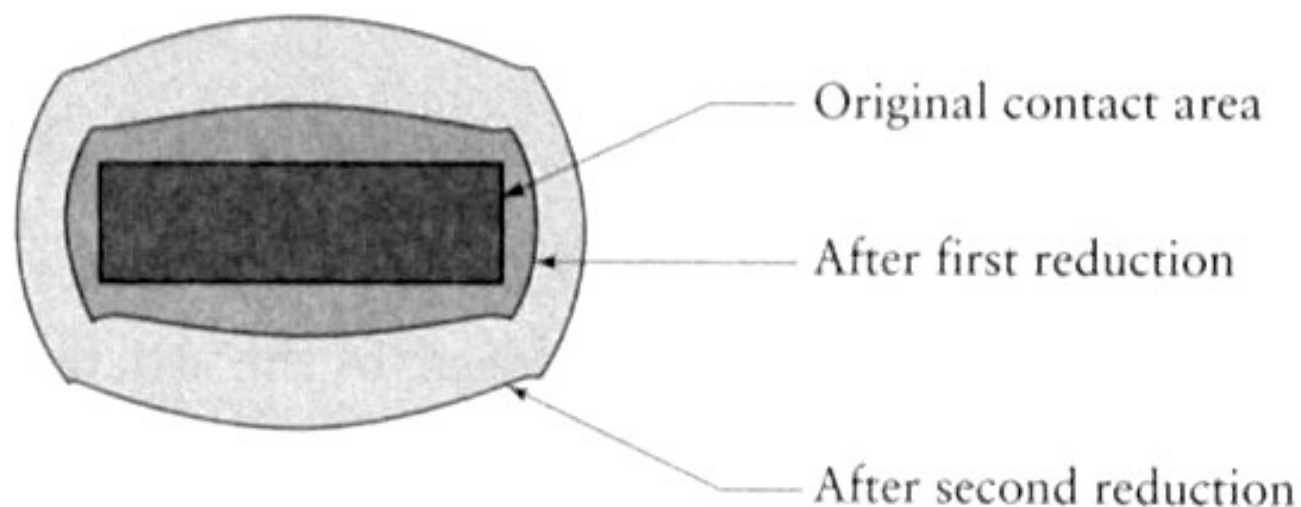
Parete calda

Parete fredda

- Il pezzo per l'attrito o gradienti di temperatura può assumere forme a botte e asimmetriche
- Per ridurre l'attrito si ricorre a lubrificazione e anche vibrazioni

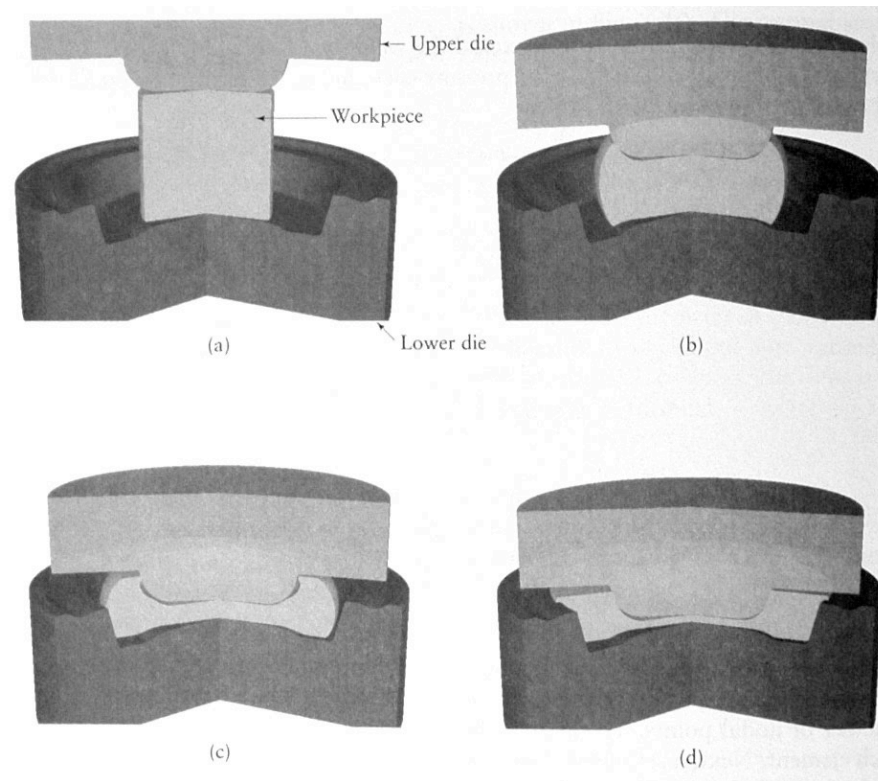
# Deformazione di sezione

- Gli assi maggiori della sezione si espandono meno causa l'attrito, in quanto la forza totale che si oppone all'espansione è maggiore in valore assoluto.
- La forma della sezione ne risulta pure distorta



# Deformazioni plastiche nella forgiatura

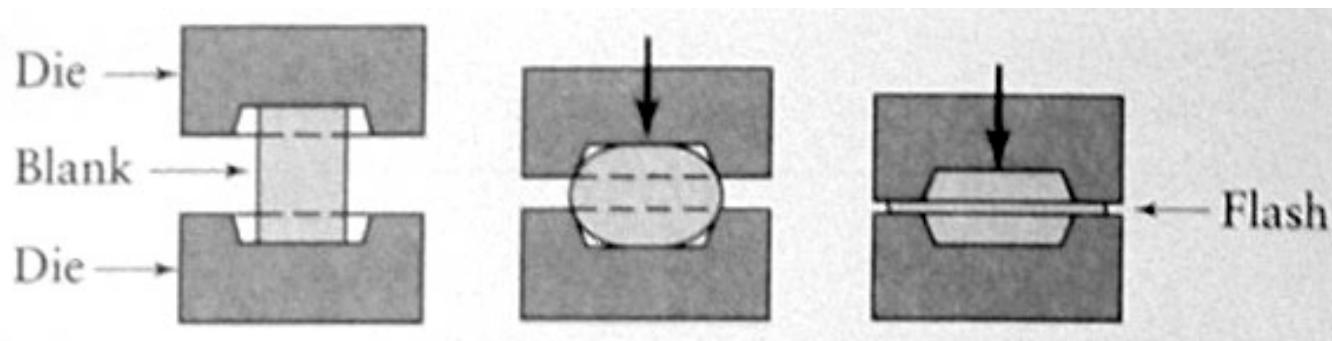
- In genere il sistema è abbastanza complicato e richiede l'uso di programmi agli elementi finiti specializzati.
- Esempio con il programma DEFORM:





# Forgiatura Impression-Die

- Si utilizza uno stampo e il pezzo viene deformato fino ad assumere la forma della cavità:



- rimangono sempre delle parti del pezzo che fuoriescono dallo stampo (flash) e sono sottoposte ad alti attriti, bloccando l'ulteriore fuoriuscita di materiale e forzando il riempimento corretto della cavità.

# Forgiatura Impression-Die

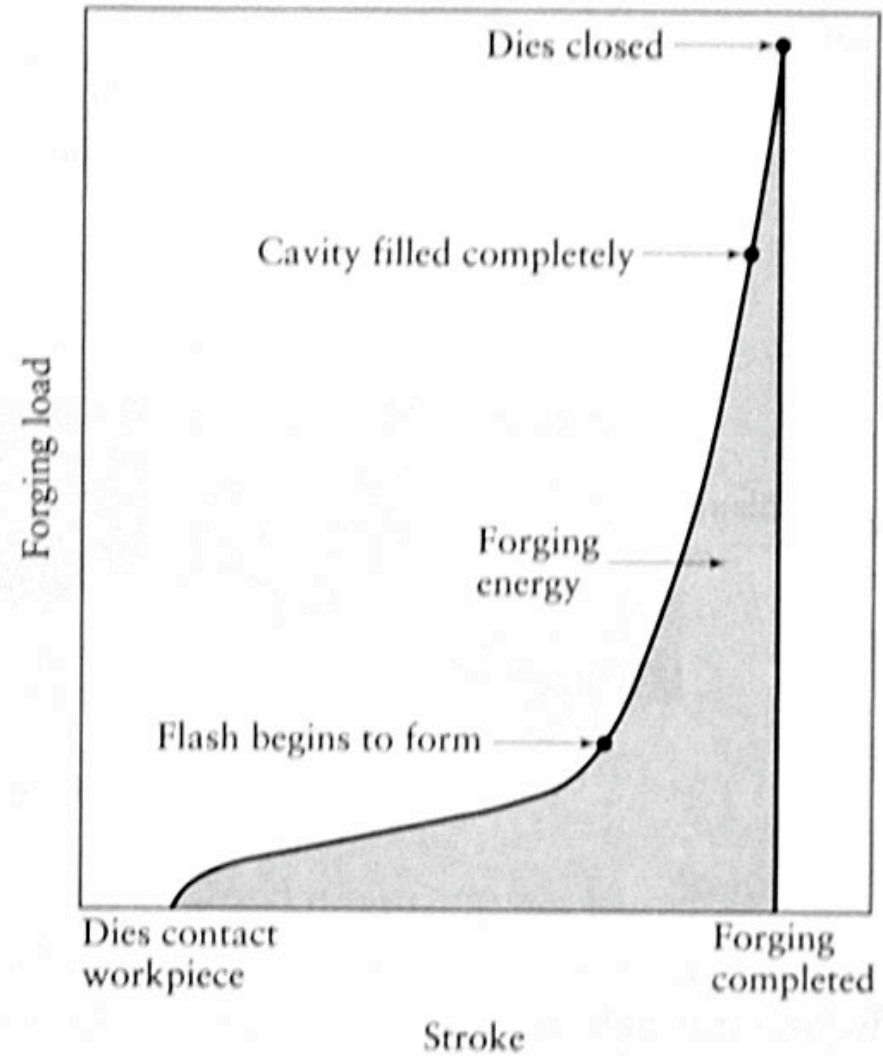
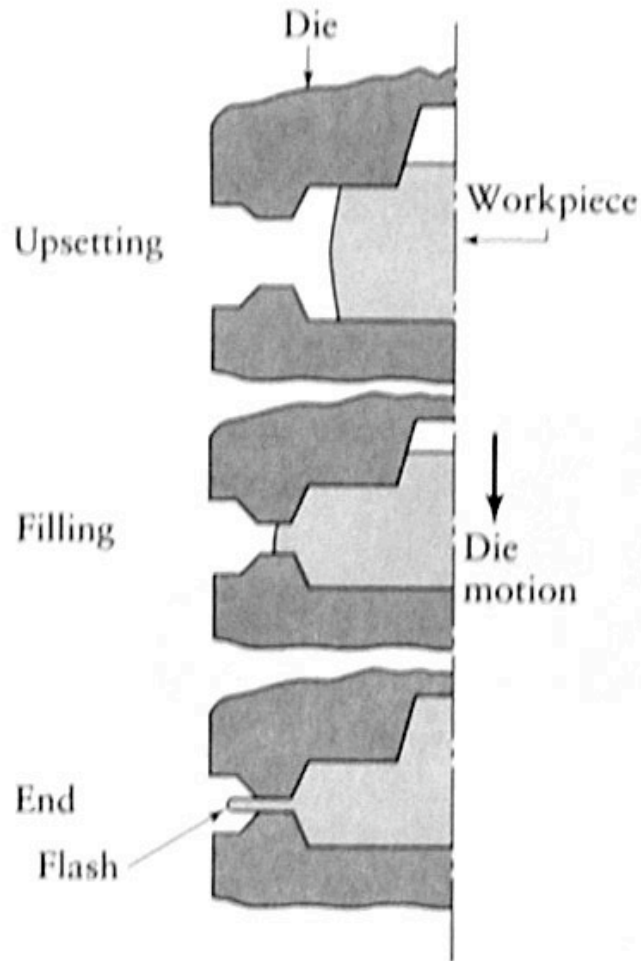
- La forza necessaria alla deformazione in questo caso è superiore a causa dell'attrito del pezzo e della parte che fuoriesce:

$$F = K_p Y_f A$$

- Il valore del fattore moltiplicante  $K_p$  è dato in tabella:

Forma pezzo semplice, senza fuoriuscita	3-5
Forma pezzo semplice, con fuoriuscita	5-8
Forma pezzo complessa, con fuoriuscita	8-12

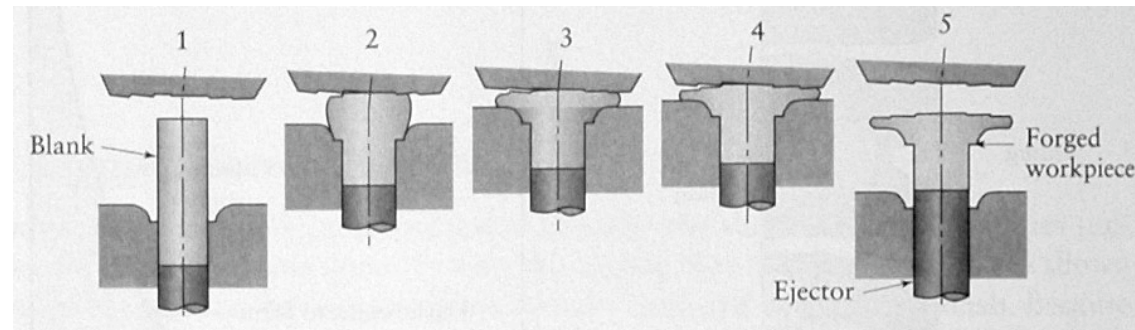
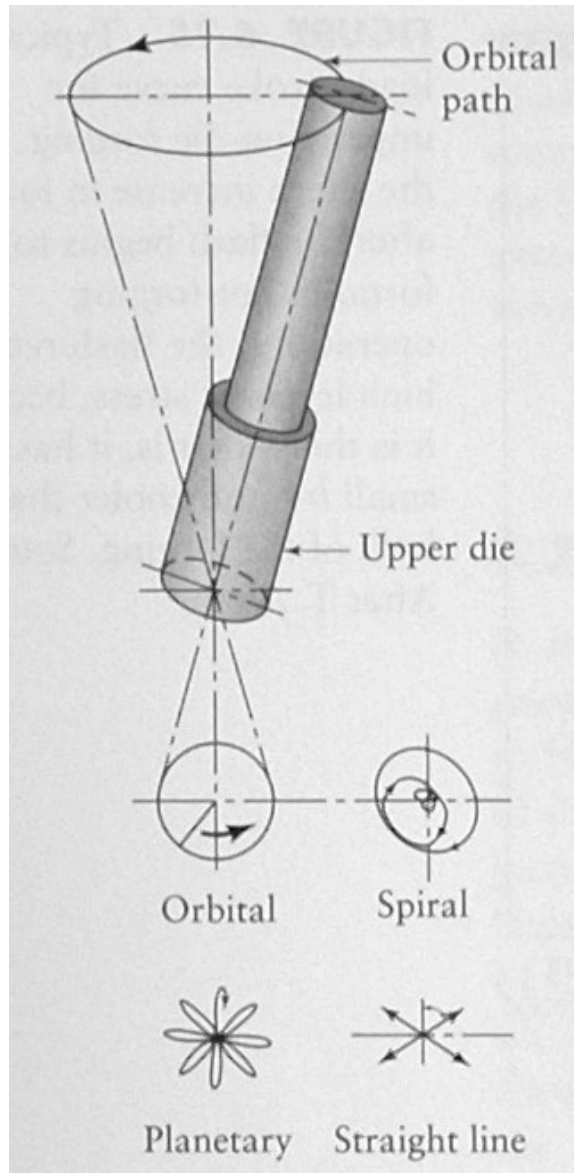
# Curva di carico tipica per forgiatura impression-die



# Forgiatura closed-die

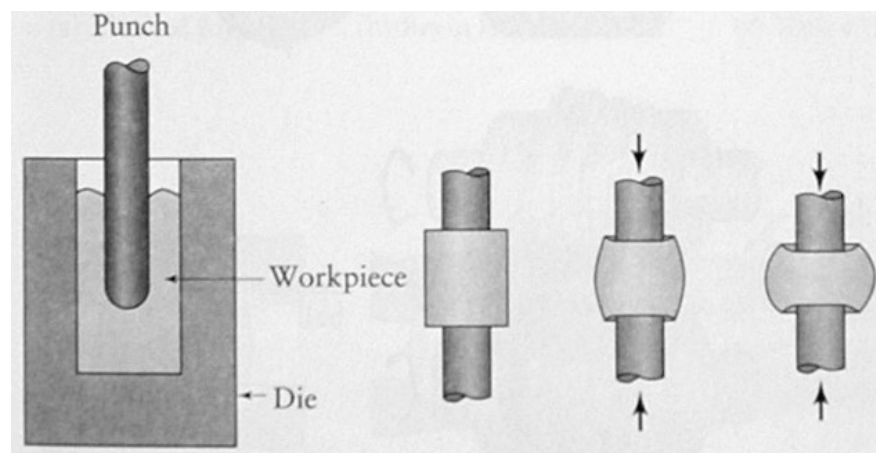
- E' simile a quella impression-die, ma senza la fuoriuscita di materiale
- La quantità di materiale necessaria deve essere calcolata esattamente come la deformazione per impedire il flusso di materiale nelle giunzioni dello stampo prima della chiusura completa
- Richiede sforzi inferiori
- Si raggiungono maggiori precisioni sui pezzi e rientra nei processi near-net shape

# Forgiatura orbitale



## Altri tipi di forgiatura

- Forgiatura incrementale: la formatura viene fatta per pressione a piccoli step fino a raggiungere la forma finale voluta.
- Coniatura: è un'altro esempio di forgiatura a stampo chiuso; è il processo con cui si coniano monete e medaglioni. La pressione richiesta può arrivare fino a 6 volte lo sforzo di deformazione plastica (flow stress) per riprodurre i dettagli fini dei rilievi.
- Piercing o indentazione: si possono anche fare buchi passanti con punzoni

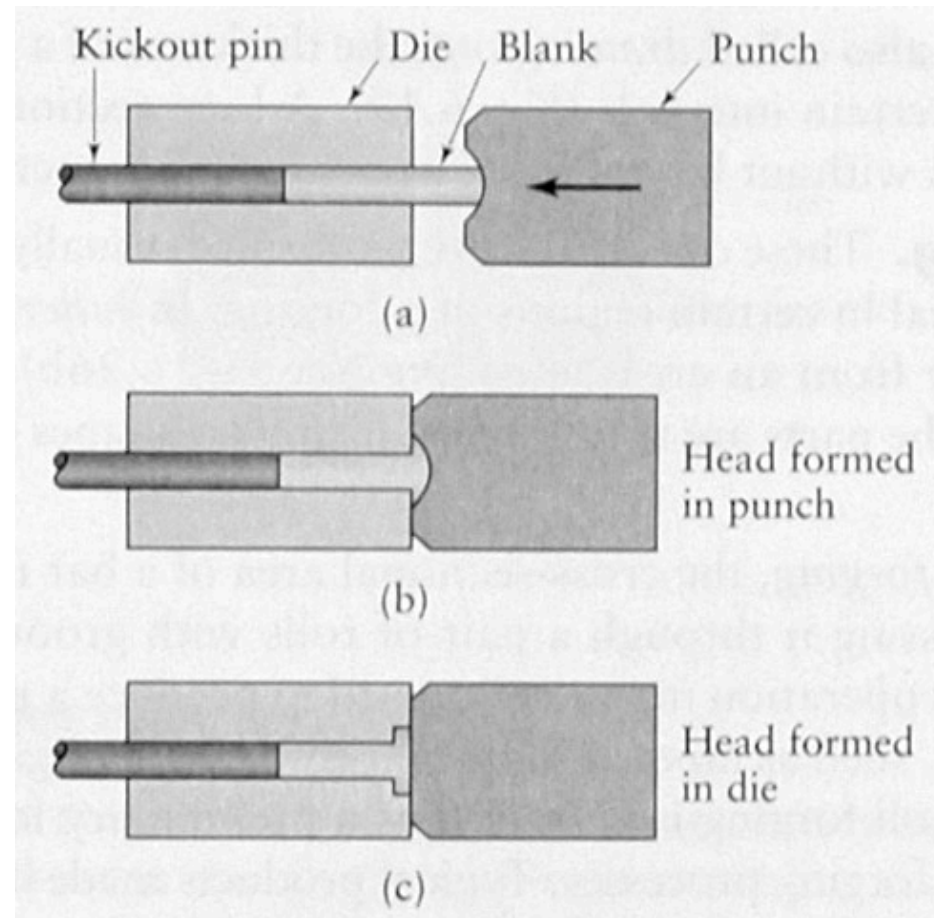


# Altri tipi di forgiatura

- Rivettatura: formatura delle teste di rivetti, bulloni, chiodi.....

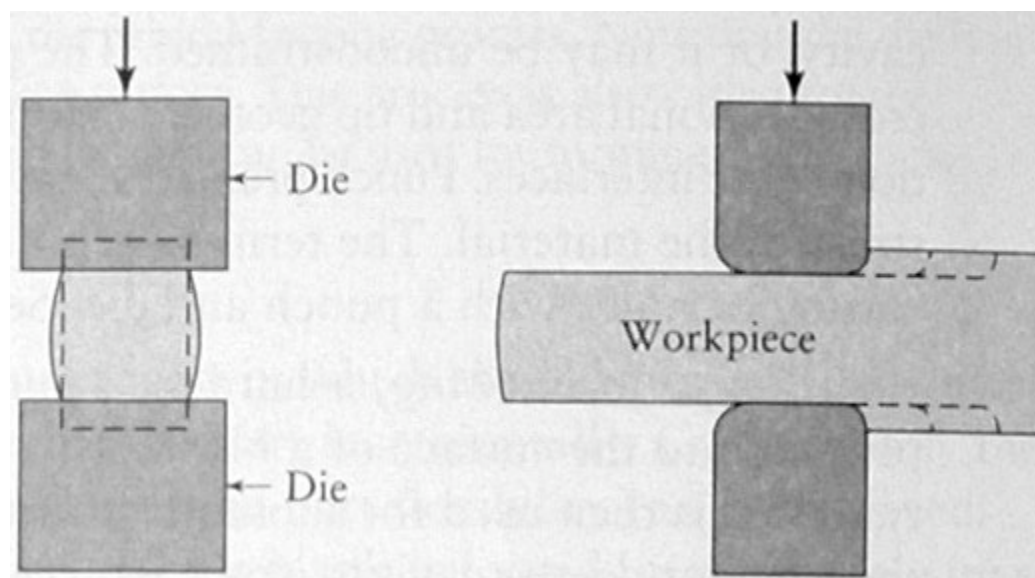
Testa formata sul pistone

Testa formata sullo stampo



## Altri tipi di forgiatura

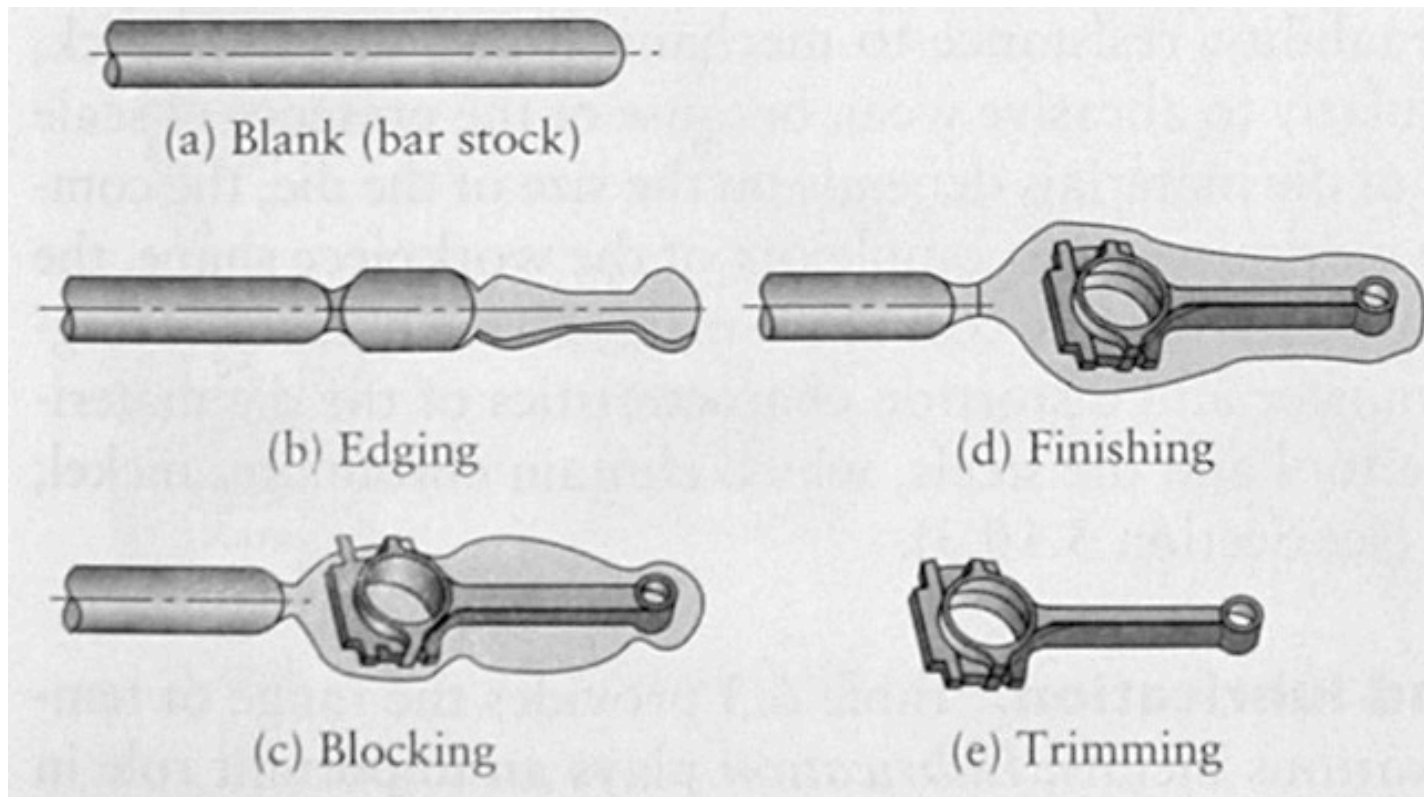
- Maschiatura: un punzone indurito crea una cavità di forma definita in uno stampo utilizzato per susseguenti operazioni di formatura.
- Cogging o forgiatura a dente: simile concettualmente alla forgiatura incrementale, la pressione viene applicata con un dente su una parte del pezzo alla volta richiedendo quindi pressioni inferiori





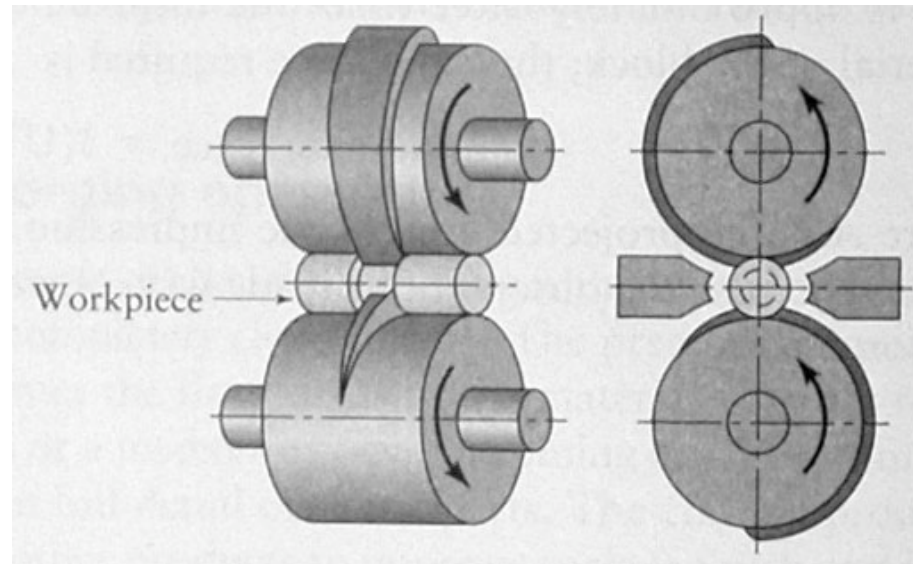
# Altri tipi di forgiatura

- Fullering e edging: con questi processi di formatura si distribuisce o concentra il materiale partendo da una barra per prepararlo ad uno step di forgiatura successivo.

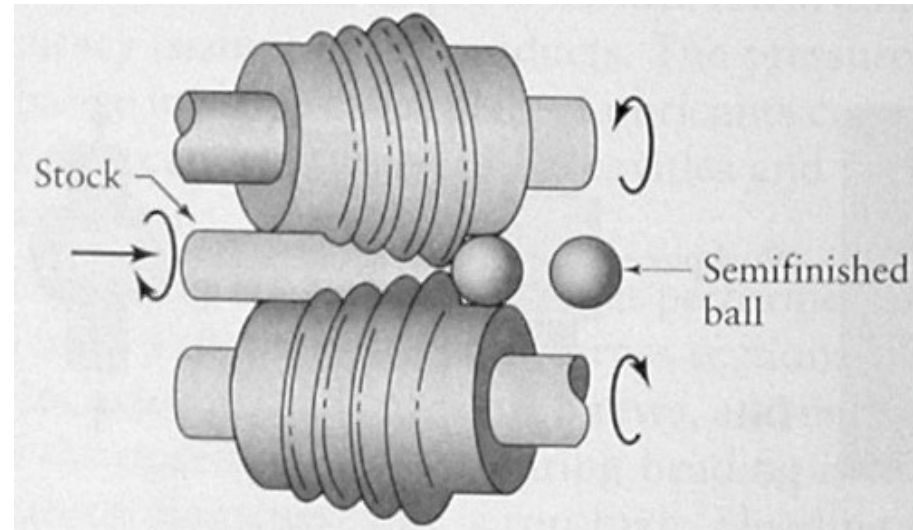


## Altri tipi di forgiatura

- Forgiatura a rullo: si fanno coltelli da tavola e utensili

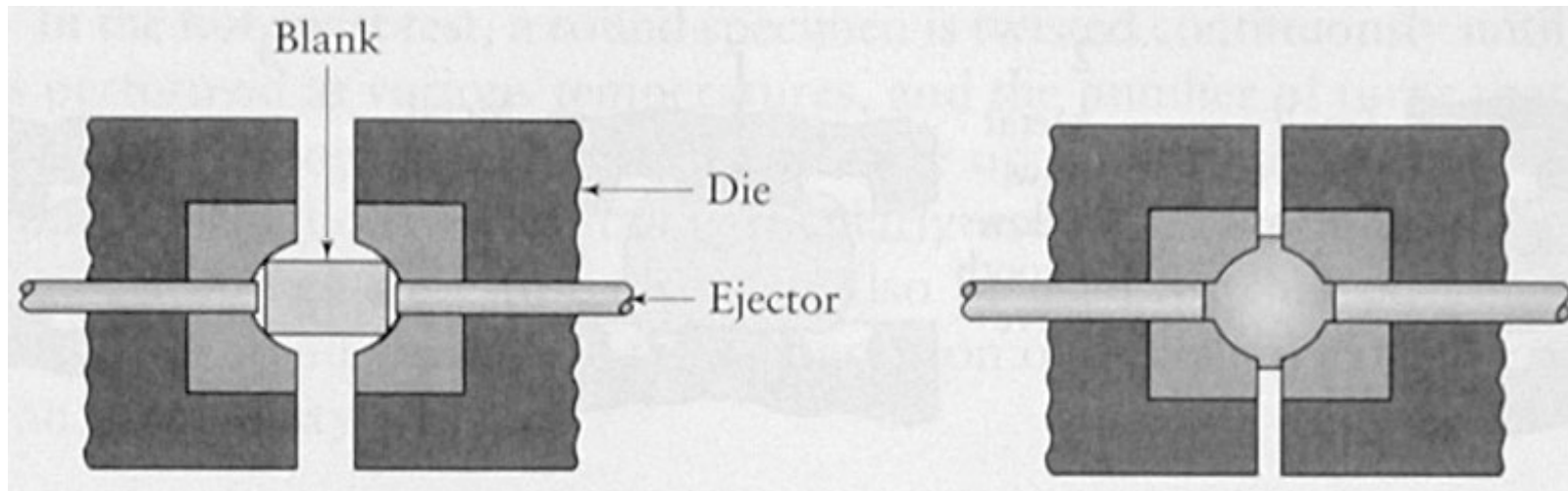


- Laminazione a vite: usata per formare sfere da cuscinetti



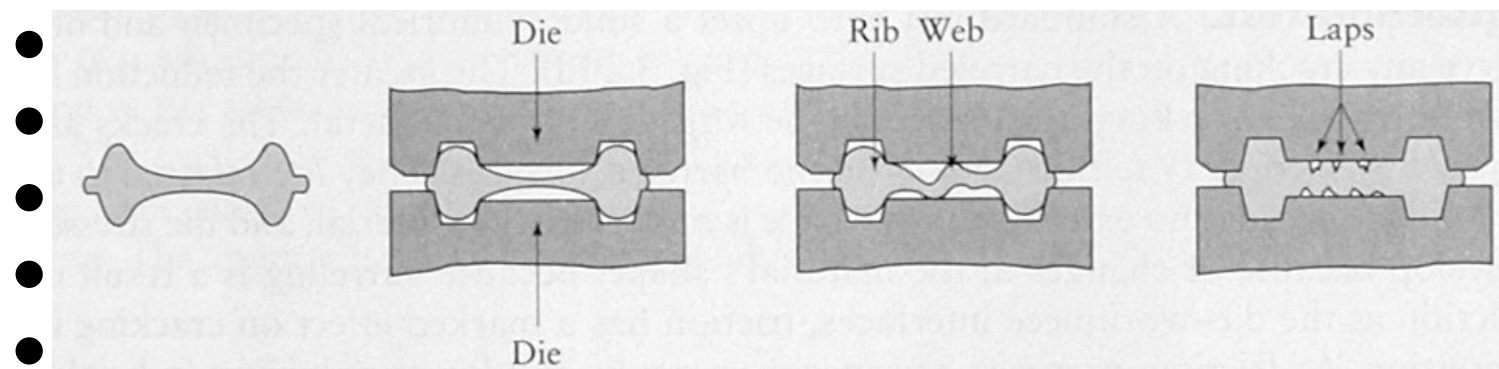
## Altri tipi di forgiatura

- Forgiatura di una sfera per cuscinetti partendo da un cilindro

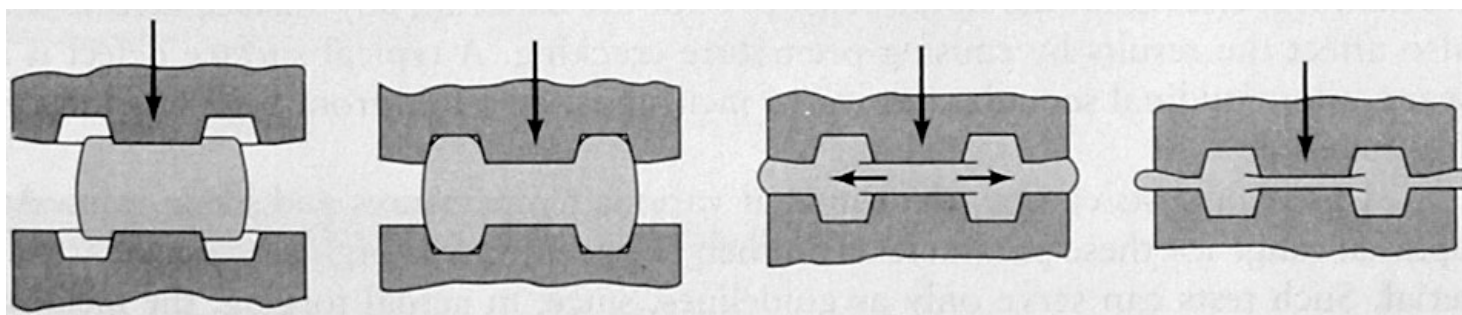


# Difetti di forgiatura

- Il difetto più frequente è quello di cricche superficiali
- Possiamo avere buckling per instabilità in compressione con sezioni sottili:

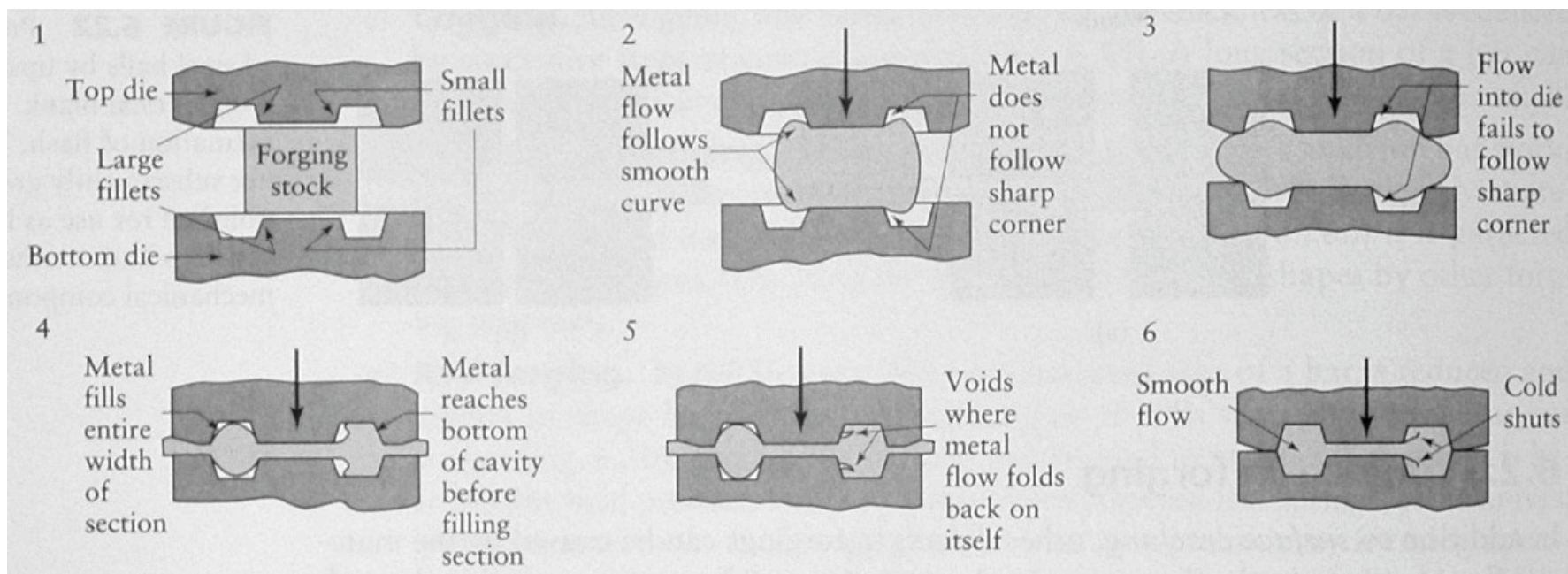


- Oppure con sezioni spesse e materiale sovrabbondante delle cricche interne da flussi non voluti:



# Difetti di forgiatura

- I raggi di curvatura troppo piccoli o spigoli vivi possono portare alla formazione di difetti, in figura la parte destra dello stampo mostra degli spigoli vivi e il materiale non riesce a seguire bene il profilo lasciando dei vuoti che vengono riempiti da flussi successivi discontinui (cold shut)



# Forgiabilità

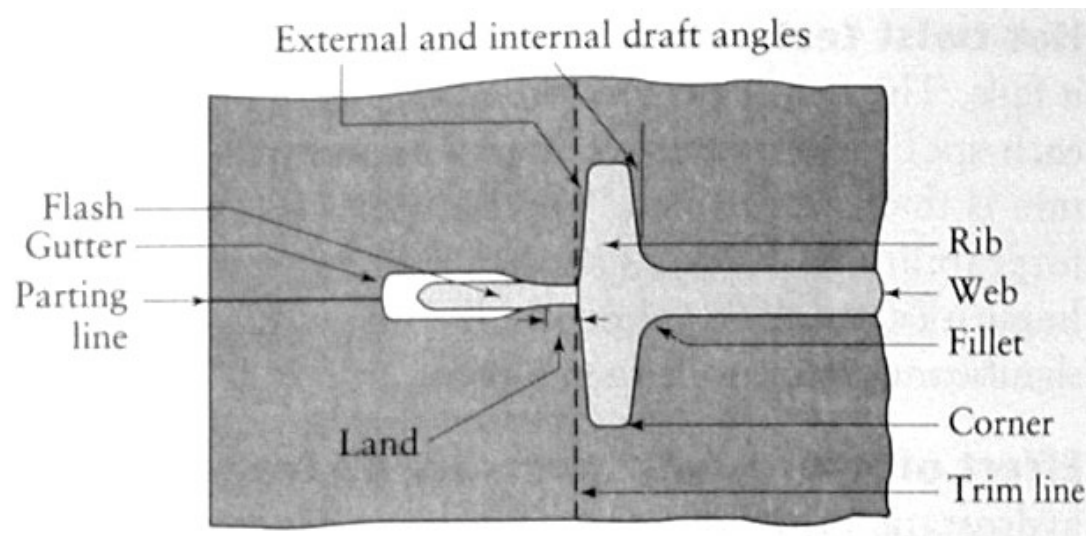
- Con forgiabilità di un metallo si intende la capacità di subire deformazione per forgiatura senza cricatura.
- Il test più tipico per stabilire la forgiabilità di un metallo è il test di compressione, dove le cricche si formano sulla superficie in corrispondenza della sezione più deformata (a botte) per sforzi secondari.
- Un'altro test è quello di torsione eseguito a caldo e viene misurato il numero di giri a rottura
- Effetto della pressione isostatica: aumenta la duttilità e quindi la forgiabilità.
- Metalli come alluminio, magnesio, rame e loro leghe, acciai basso legati e al carbonio hanno buona forgiabilità.
- Metalli e leghe per alte temperatura bassa forgiabilità.

# Progettazione stampi per forgiatura

- La progettazione è molto importante per ottenere il pezzo voluto senza difetti e senza distorsioni dello stampo stesso a seguito degli alti carichi utilizzati.
- La progettazione riguarda non solo lo stampo in se stesso ma anche la forma del semilavorato di partenza, le sue dimensioni e la quantità esatta di materiale da utilizzare.
- Spesso bisogna progettare il processo inserendo degli step di forgiatura iniziali tipo edging o fullering per ottenere una preformatura adatta poi alla forgiatura finale nella forma complessa. Vi può essere bisogno di un ulteriore step finale di finitura per forgiatura effettuata alle pressioni maggiori in grado di definire il dettaglio.

# Progettazione stampi per forgiatura

- La linea di congiunzione degli stampi può essere anche non diritta, ma deve essere localizzata nella zona che più facilita la rimozione del pezzo e disturbi meno il pezzo.
- Stesso criterio vale per i flash o fuoriuscite dallo stampo.
- E' importante utilizzare degli angoli opportuni ( $3-10^\circ$ ) per l'estrazione dei pezzi come da figura:





## Materiali per lo stampo e temperature

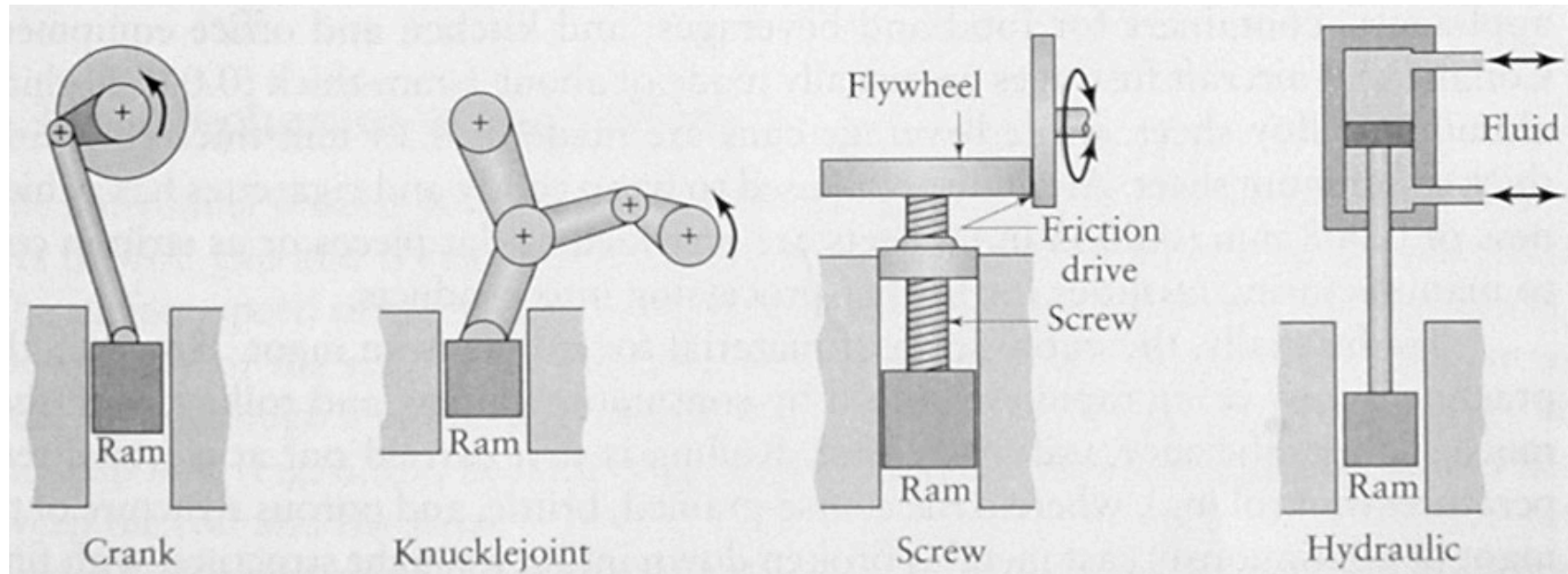
- Devono resistere e non rompersi ad elevate temperature e pressioni, si utilizzano acciai per utensili (rapidi) e stampi. Sono acciai altolegati contenenti Cr, Ni, Mo e V.
- Gli stampi vengono ricoperti con lubrificanti che abbiano anche funzione di barriera termica tra il pezzo caldo e lo stampo freddo, nonchè facilitino il distacco. A caldo si utilizza grafite, disolfuro di molibdeno o vetro. A freddo oli minerali e saponi.
- Temperature di forgiatura a caldo:

Metallo	Leghe Al	Leghe Cu	Leghe Ni	Acciai	Leghe Ti	Leghe refrattarie
T (°C)	400-450	625-950	870-1230	925-1260	750-795	975-1650

# Macchine per forgiatura

- Il tipo di macchina da utilizzare per la forgiatura è scelto in base alla pressione massima da realizzare ed alla velocità di lavoro e incremento del carico:
  - presse idrauliche: permettono pressioni elevate ma basse velocità. Lavorano a pressione massima (cioè si fermano alla pressione impostata). Arrivano a 75000 t.
  - Presse meccaniche: meno carico, maggiore velocità, si controlla lo spostamento massimo. Arrivano a 12000 t.
  - Presse a vite: alte pressioni, bassa velocità, sono usate per piccole produzioni di precisione (es. turbine aeronautiche). Arrivano a 31500 t
  - Magli o martelli: convertono l'energia potenziale in energia cinetica. Lavorano in energia di impatto. Si possono avere anche sistemi a doppio maglio. Massima energia: 1200 kJ.

# Macchine per forgiatura



- In genere si utilizzano presse per Al, Mg, Be, bronzi e ottoni.
- Si preferiscono magli per rame, acciai, titanio e leghe refrattarie.
- Le presse lavorano a pochi colpi al minuto, mentre si arriva a 300 colpi al minuto con magli potenti.