



Tecnologie delle Costruzioni Aerospaziali

LAVORAZIONI PER DEFORMAZIONE PLASTICA

PARTE 2

Prof. Claudio Scarponi
Ing. Carlo Andreotti



FORGIATURA

Il processo di forgiatura risale al 4000 a.C. In antichità questo metodo era utilizzato per realizzare gioielli, monete e altri oggetti tramite la percussione del metallo a opera di utensili realizzati in pietra.

Si fabbricano pezzi meccanici o per macchinari che richiedono alta resistenza meccanica (alberi motore, dischi, turbine, ingranaggi, cerchi, utensili, bulloni e dadi, ecc.).

Si deforma progressivamente nella forma voluta una massa di metallo attraverso successive azioni di ricalcatura eseguite mediante una pressa o un maglio.

La forgiatura viene effettuata secondo tre modalità, in base alla temperatura T di lavoro:

- **Forgiatura a freddo** ($T/T_f < 0.3$), dove T_f è la temperatura di fusione.
- **Forgiatura a media temperatura** ($0.3 < T/T_f < 0.6$).
- **Forgiatura a caldo** ($T/T_f > 0.6$).



FORGIATURA

Esistono tre tipi di forgiatura:

- **Open-Die.**
- **Impression-Die.**
- **Closed-Die.**

In generale i forgiati sono soggetti ad ulteriori operazioni di finitura, come i trattamenti termici per modificare le proprietà e le lavorazioni meccaniche per ottenere dimensioni finali e finitura superficiale accurate. Queste operazioni possono essere minimizzate dall'utilizzo della *forgiatura di precisione* (processi di formatura *net-shape* o *near-net shape*).



FORGIATURA: FORGIATURA A STAMPO APERTO (OPEN-DIE)

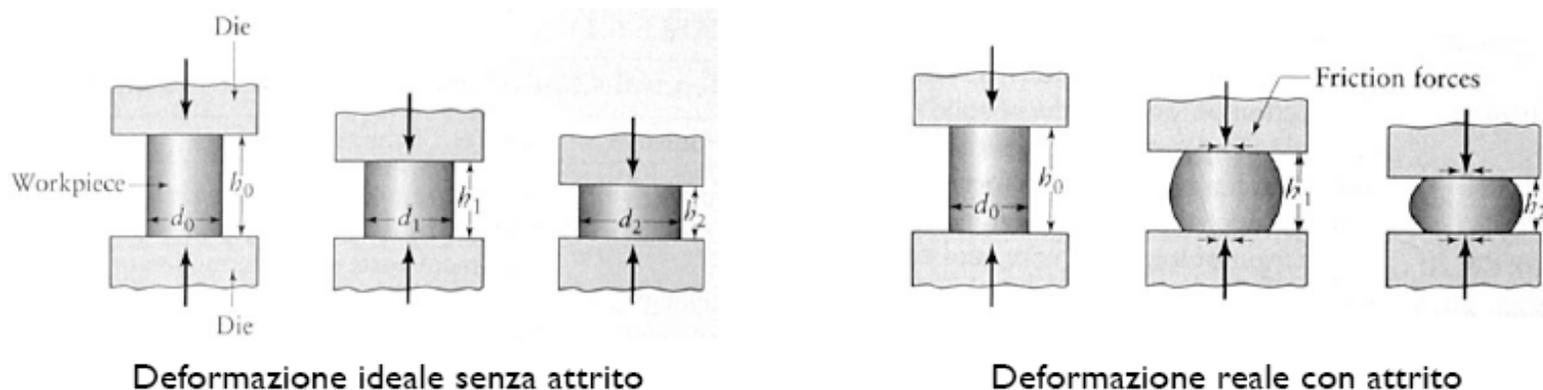
Rappresenta l'operazione di forgiatura più semplice.

Anche se la maggior parte delle macchine per forgiatura a stampo aperto applicano forze tra i 15 kg e i 500 kg, sono state realizzate anche macchine che applicano forze di 300 t.

Il pezzo in lavorazione è premuto tra le facce del pistone e dell'incudine, alle quali possono essere adattate parti con superfici opportunamente sagomate in relazione alla forma che si deve imprimere (ovviamente esse devono avere una resistenza alla deformazione nettamente superiore a quella del metallo lavorato).

FORGIATURA: FORGIATURA A STAMPO APERTO (OPEN-DIE)

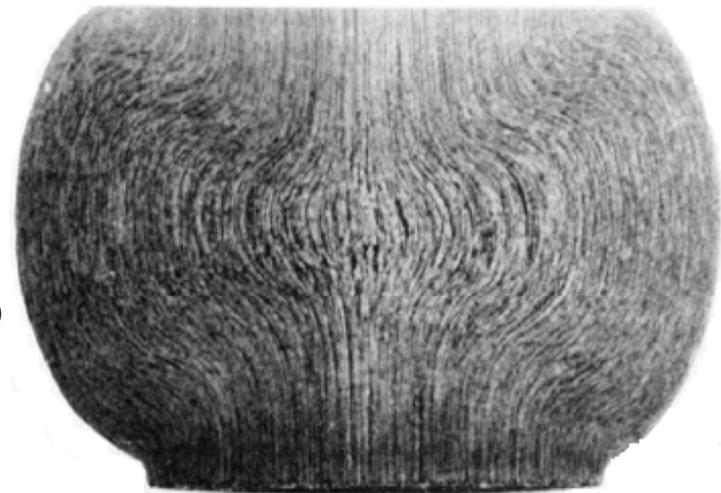
La figura seguente mostra uno schema di forgiatura a stampo aperto:



Durante la deformazione plastica, nel volume del metallo lavorato si formano superfici di scorrimento che, in generale, corrispondono a quelle ideali sulle quali agiscono le massime tensioni tangenziali.

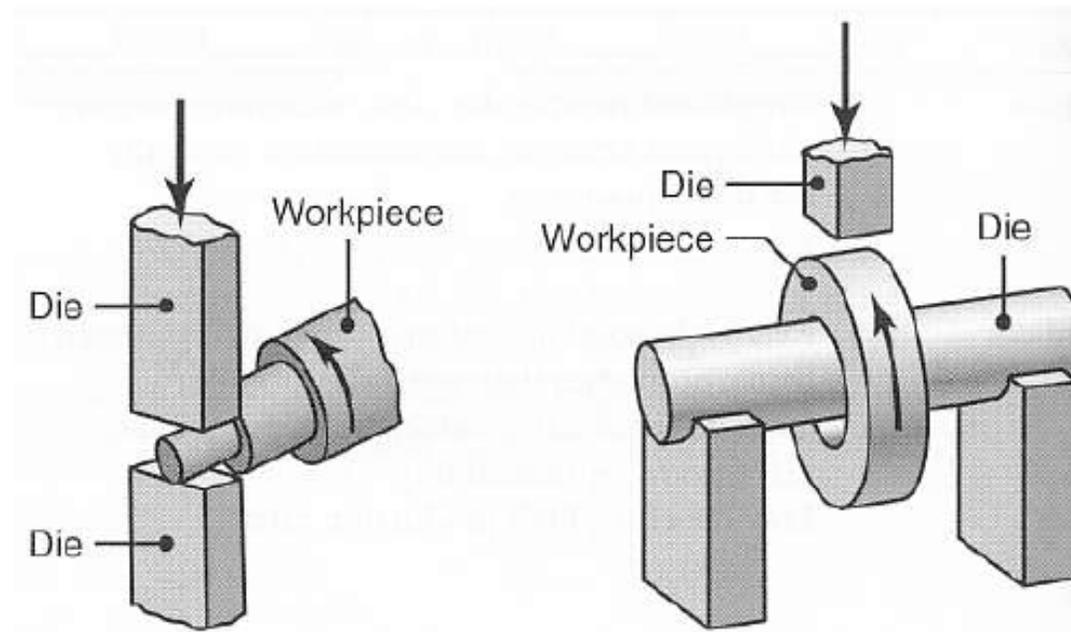
FORGIATURA: FORGIATURA A STAMPO APERTO (OPEN-DIE)

Nel caso ideale, in assenza di forze d'attrito, si assiste ad una diminuzione di altezza ed a un aumento di diametro. Nel caso reale, invece, la presenza di forze di attrito causa un ingobbamento laterale con una caratteristica forma "a botte" (barrel). Questo fenomeno, noto con il nome di ***barreling***, è caratterizzato da un raffreddamento del materiale nelle vicinanze delle superfici dello stampo, mentre il resto del pezzo rimane relativamente caldo. Di conseguenza, poiché il materiale freddo ha una resistenza alla deformazione maggiore di quello caldo al centro, la porzione centrale si espande lateralmente. Questo fenomeno può essere limitato utilizzando stampi riscaldati o lubrificanti.



FORGIATURA: FORGIATURA A STAMPO APERTO (OPEN-DIE)

Alcuni esempi di forgiatura a stampo aperto sono rappresentati dalla riduzione del diametro di una barra e dalla riduzione dello spessore di un anello, come mostrato dalle seguenti figure:

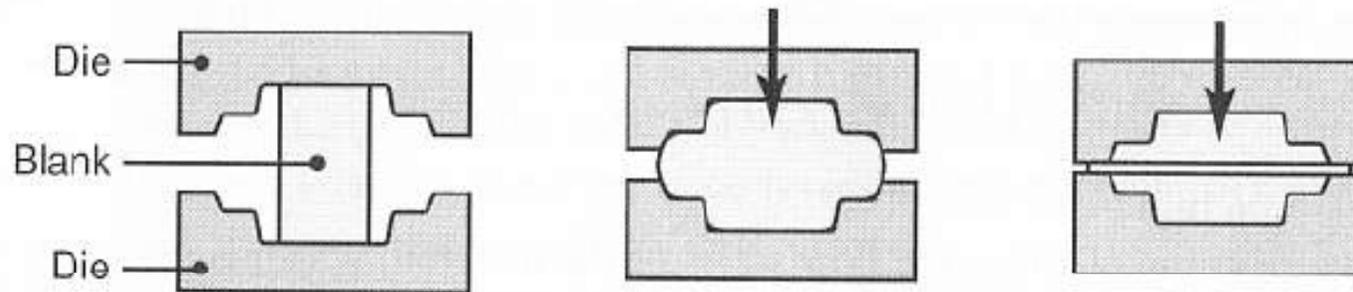


FORGIATURA: FORGIATURA IMPRESSION-DIE

In questo tipo di forgiatura il pezzo è compresso tra due stampi sagomati e costretto ad assumere la forma della cavità tra essi compresa.

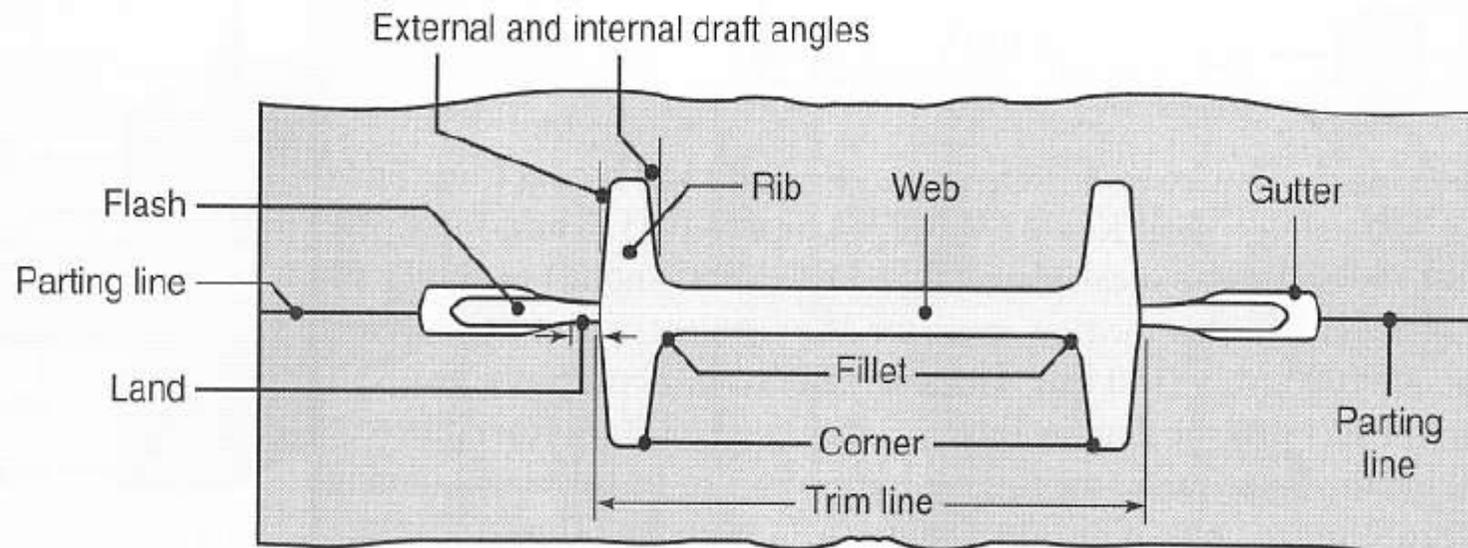
In generale, questo processo è eseguito ad elevate temperature per favorire la duttilità del metallo da lavorare e ridurre la forza applicata.

Durante la deformazione una parte del materiale è libero di fuoriuscire dallo stampo (flash). La parte fuoriuscita ha un importante ruolo nella forgiatura Impression-Die: a causa dell'alta pressione, l'elevata forza di attrito impedisce l'ulteriore fuoriuscita di materiale e forza il corretto riempimento della cavità.



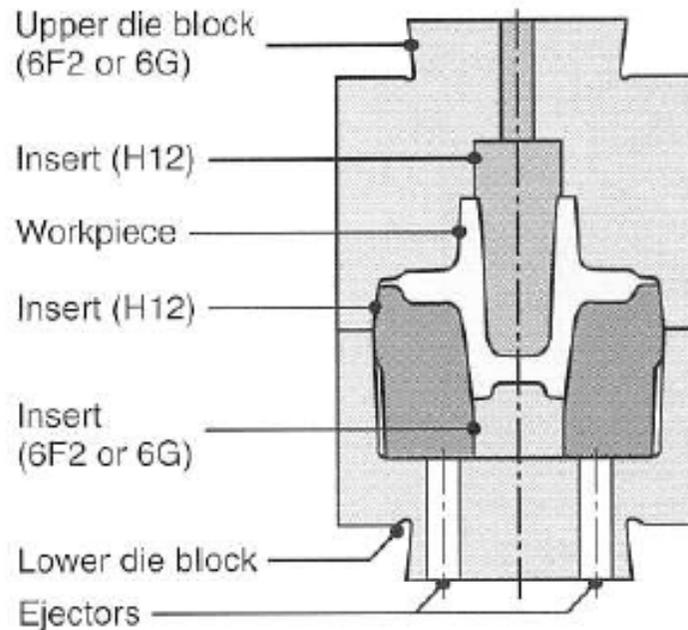
FORGIATURA: FORGIATURA IMPRESSION-DIE

In una tipica forgiatura a stampo è universalmente riconosciuta una terminologia standard, mostrata nella seguente figura:



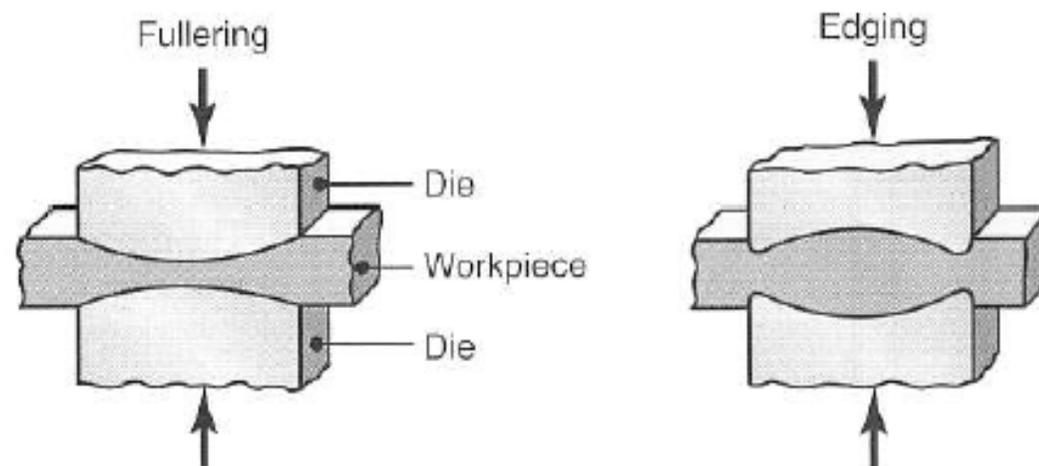
FORGIATURA: FORGIATURA IMPRESSION-DIE

Alcuni stampi non sono costituiti da un unico blocco, ma sono realizzati tramite più elementi intercambiabili, chiamati *die inserts*, e sono utilizzati per realizzare forme complesse. Questi stampi aggiuntivi possono essere facilmente sostituiti e sono realizzati in materiale altamente resistente. Un esempio è rappresentato dalla forgiatura di un telaio porta assale:



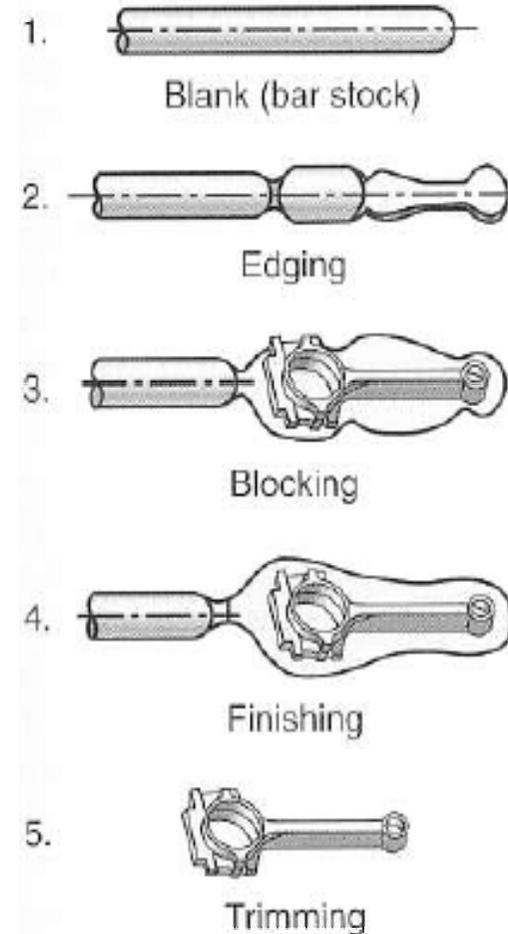
FORGIATURA: FORGIATURA IMPRESSION-DIE

Per realizzare un pezzo di geometria particolare e per distribuire in modo corretto il materiale nelle diverse regioni della cavità spesso si ricorre ad una forgiatura a fasi successive. Si indica con il termine **fullering** l'operazione che prevede una strozzatura del pezzo e uno scorrimento del materiale verso l'esterno. Si indica con **edging** l'operazione in cui il materiale è costretto a concentrarsi all'interno di una determinata area.



FORGIATURA: FORGIATURA IMPRESSION-DIE

Un esempio è rappresentato dalla forgiatura di una biella per un motore a combustione interna. Dopo l'operazione di edging, seguono le operazioni di **blocking**, in cui il pezzo è realizzato in una forma grezza tramite stampi chiamati **blocker dies**, di **finishing**, in cui si conferisce al pezzo la forma finale, e di **trimming**, in cui si elimina il materiale fuoriuscito durante la forgiatura.





FORGIATURA: FORGIATURA A STAMPO CHIUSO (CLOSED-DIE)

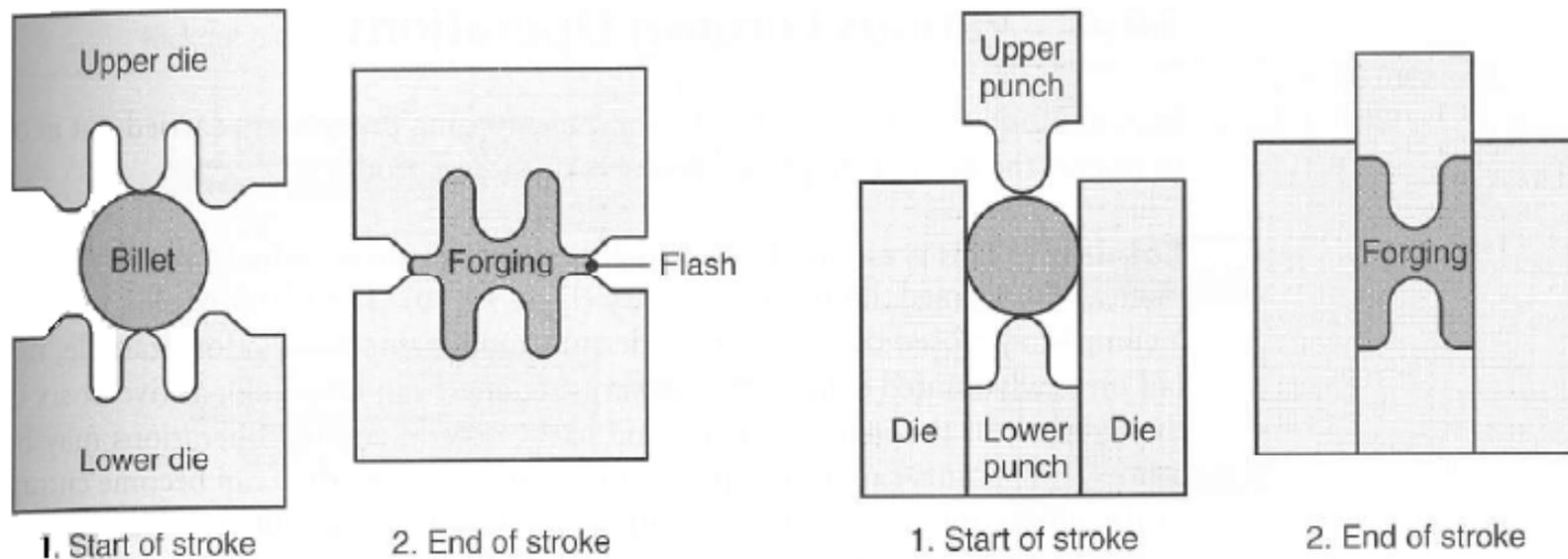
E' un tipo di forgiatura molto simile alla forgiatura Impression-Die, ma non prevede la fuoriuscita di materiale, con un conseguente riempimento completo della cavità creata dagli stampi.

La pressione di forgiatura è molto elevata e, di conseguenza, la quantità di materiale necessaria deve essere calcolata in modo esatto, così come la deformazione, per impedire il flusso di materiale nelle giunzioni dello stampo prima della chiusura completa.

Con questa tecnica si raggiungono maggiori precisioni sui pezzi e ci si avvicina ai processi *near-net shape*.

FORGIATURA: FORGIATURA A STAMPO CHIUSO (CLOSED-DIE)

La seguente figura mostra un confronto tra la forgiatura Impression-Die e la forgiatura Closed-Die:





FORGIATURA: FORGIATURA DI PRECISIONE (PRECISION)

La forgiatura di precisione è un processo che tende a ridurre il numero di operazioni di finitura addizionali e, di conseguenza, i costi.

Tipici prodotti realizzati con forgiatura di precisione sono ingranaggi, bielle, palette di turbina, ecc.

La forgiatura di precisione richiede stampi speciali e molto complessi, controllo accurato del volume e della forma, posizionamento accurato del blocco di materiale all'interno della cavità. Inoltre, a causa delle elevate pressioni, questo processo richiede un equipaggiamento di elevata capacità.



FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

1. Coniatura (coining).

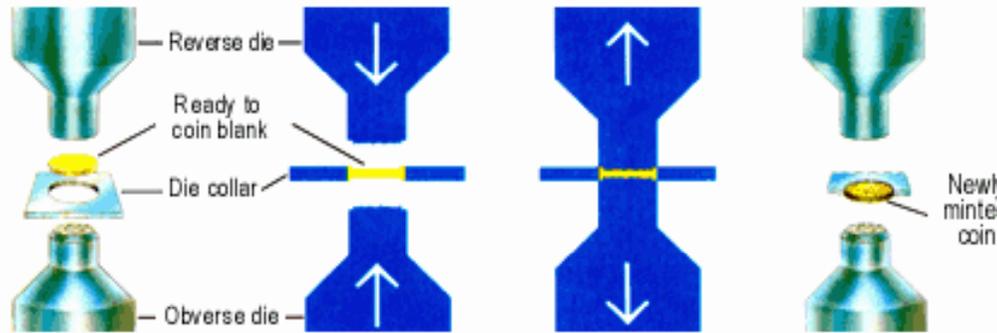
E' un processo di forgiatura a stampo chiuso utilizzato per produrre monete, medaglie e gioielli.

Al fine di realizzare dettagli accurati, le pressioni richieste sono elevate e possono raggiungere valori pari a 5 o 6 volte la resistenza del materiale.

Non possono essere utilizzati lubrificanti, per il rischio che essi rimangano intrappolati nella cavità e impediscano la fedele riproduzione delle immagini (essendo incomprimibili).

FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

La deformazione è limitata alle zone superficiali di contatto con gli stampi.





FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

2. Ricalcatura (heading).

E' un'operazione generalmente realizzata su una estremità di una barra cilindrica con l'obiettivo di incrementare la sezione trasversale.

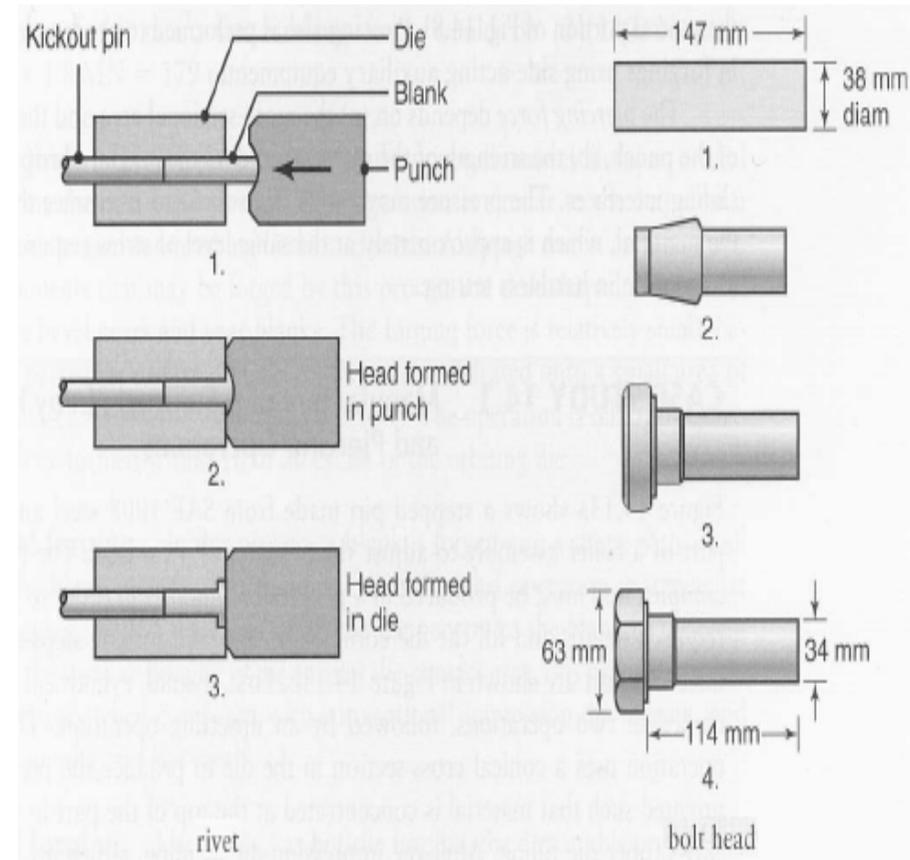
Esempi tipici sono i chiodi, le teste dei bulloni, la viti, i rivetti, ecc.

La ricalcatura può essere realizzata a caldo, a temperatura media o a freddo.

Un'importante fenomeno da tenere presente è la tendenza della barra ad incurvarsi nel caso in cui non sia supportata lungo la dimensione maggiore.

FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

L'operazione di ricalcatura è realizzata tramite macchinari chiamati ricalcatrici (headers), che, in genere, sono automatici e sono in grado di produrre centinaia di pezzi al secondo in base alle dimensioni. Un aspetto negativo di questi macchinari è la rumorosità (gli operatori utilizzano protezioni per le orecchie).





FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

3. Indentazione (piercing).

E' un processo che prevede l'utilizzo di un punzone (punch) per produrre una cavità o un'impronta sulla superficie del pezzo da lavorare.

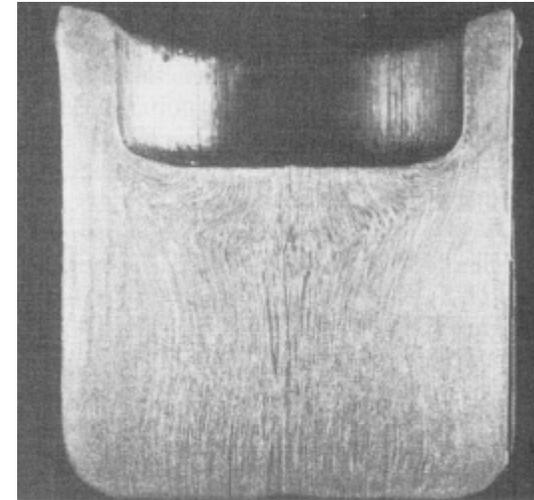
Il pezzo può essere libero o racchiuso in un contenitore (come la cavità formata dagli stampi).

Un esempio comune di indentazione si può riscontrare nelle cavità esagonali delle teste dei bulloni.

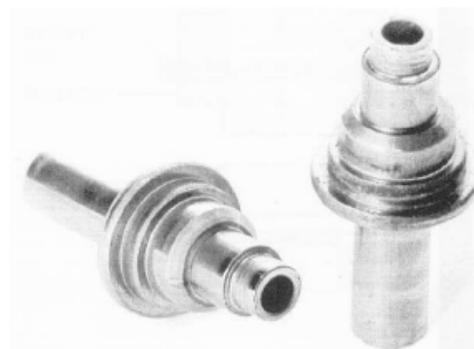
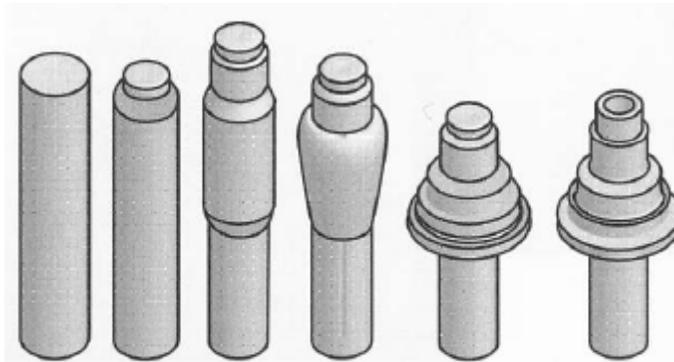
La forza necessaria dipende dall'area della sezione resistente, dalla forma della punta del punzone, dalla resistenza del materiale e dall'intensità dell'attrito in corrispondenza delle superfici di scorrimento. La pressione può raggiungere valori tra 3 e 5 volte la resistenza del materiale (il livello è simile a quello richiesto per effettuare un'indentazione in un test di durezza).

FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

La figura accanto mostra lo scorrimento dei grani a seguito di un'indentazione su una billetta rotonda.



Come ulteriore esempio si riporta la realizzazione di un perno a gradini tramite operazioni di ricalcatura e di indentazione:





FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

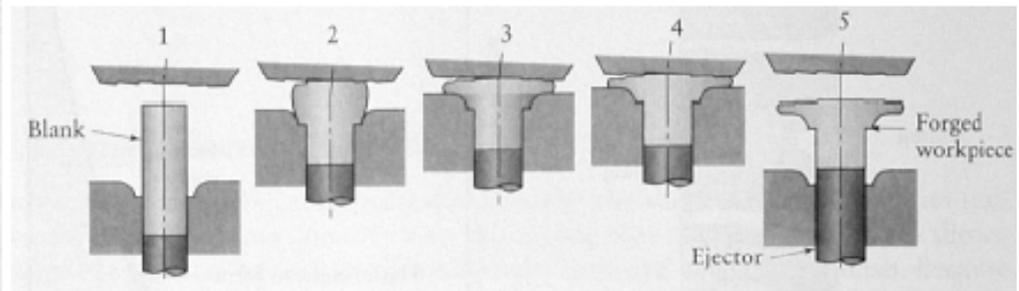
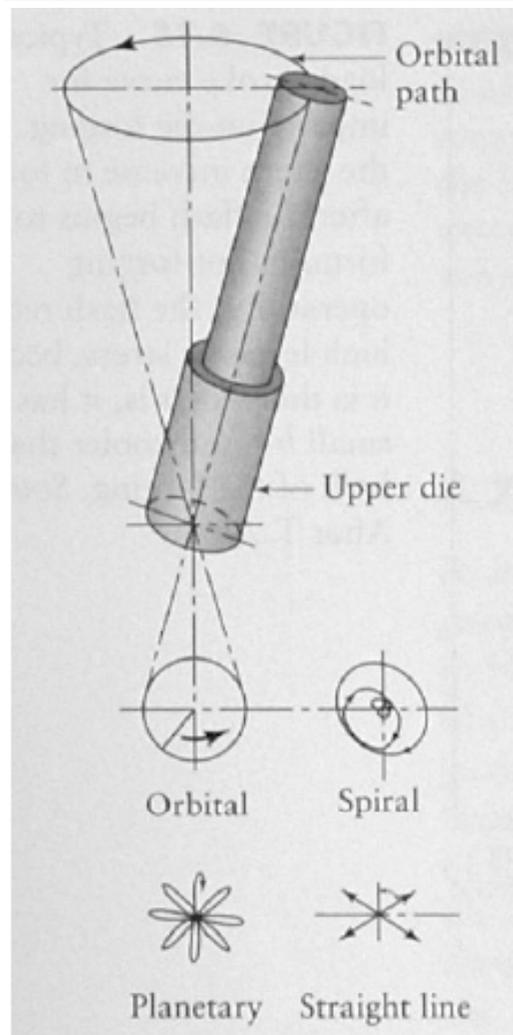
4. Forgiatura orbitale.

E' un processo in cui lo stampo superiore segue un percorso circolare e conferisce la forma al metallo sottostante in modo *incrementale*. L'azione è simile a quella di un mortaio e di un pestello utilizzati per macinare erbe e semi.

La forza necessaria è relativamente bassa poiché, in ogni istante, il contatto tra lo stampo e il pezzo avviene in un'area molto limitata.

Anche se non di uso comune, i componenti tipici che possono essere utilizzati con questo processo sono dischi sagomati e parti coniche, come ingranaggi conici o anelli forati.

FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA



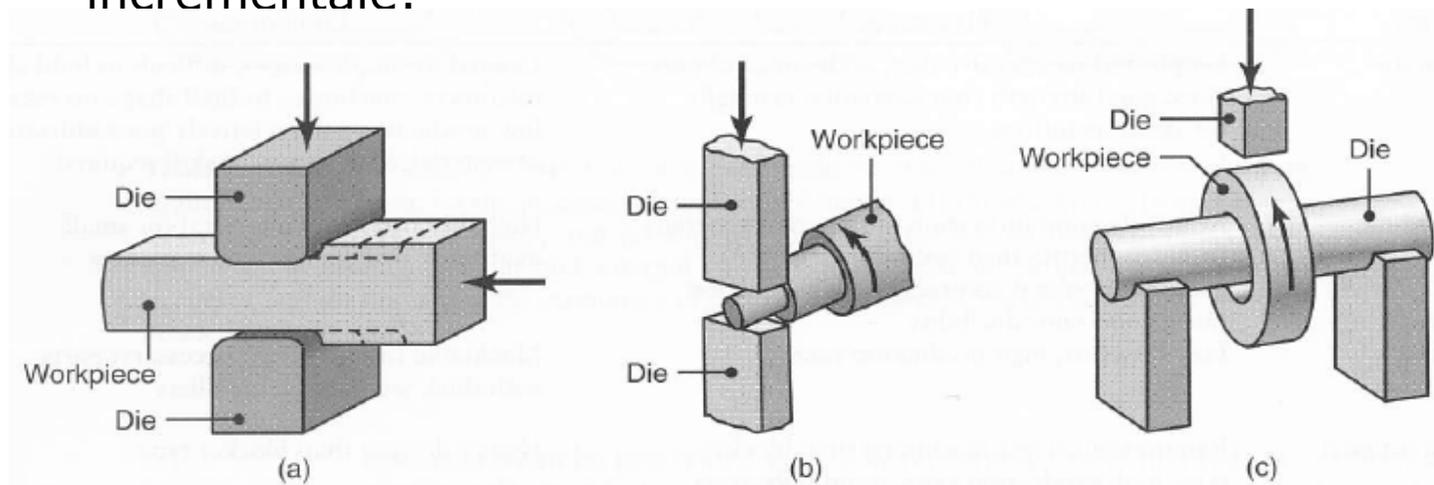
FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

5. Forgiatura incrementale.

In questo processo la forma desiderata è conferita al pezzo in lavorazione tramite una serie di fasi successive.

Poiché l'area di contatto è molto limitata, la forza necessaria è bassa.

La seguente figura mostra tre esempi di forgiatura incrementale:

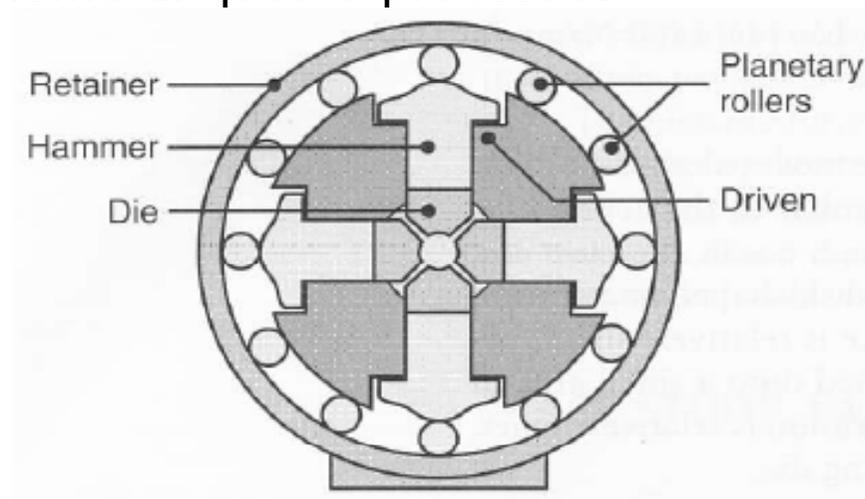


FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

6. Forgiatura rotativa.

In questo processo si sottopone una barra o un tubo a forze radiali impattanti tramite una serie di stampi intercambiabili.

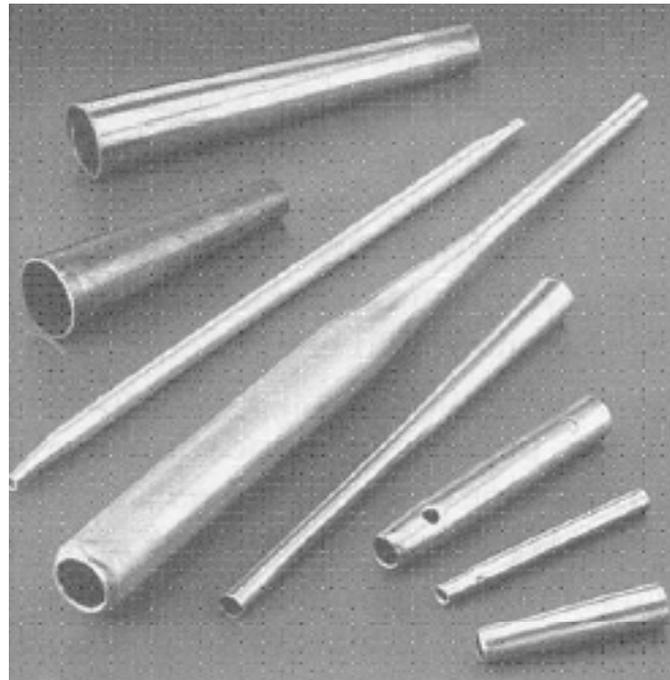
I movimenti degli stampi sono realizzati tramite una serie di rulli alloggiati in un involucro, in un modo simile a quello permesso dai cuscinetti a rulli. La seguente figura mostra uno schema di questo processo:



FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

Il pezzo in lavorazione è fermo e gli stampi ruotano.

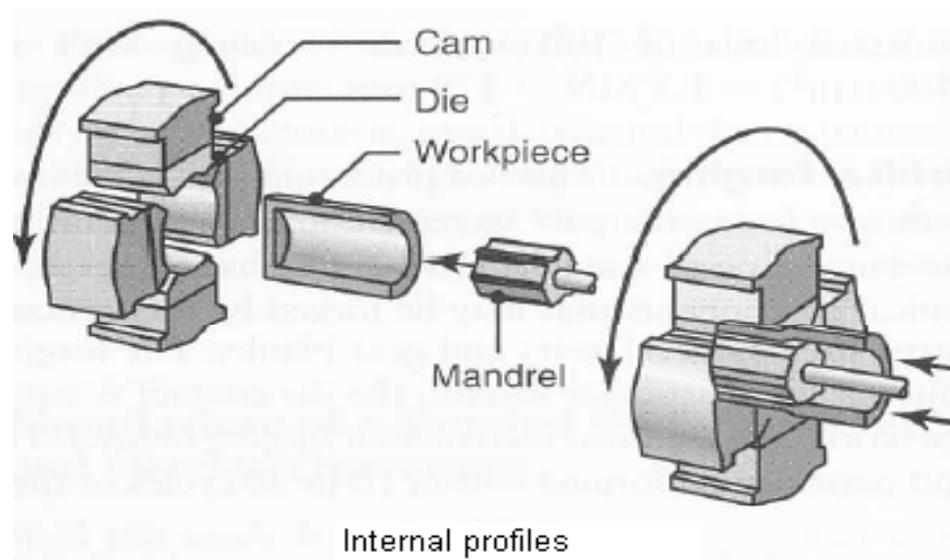
Tipici componenti realizzati con questa tecnica sono le punte dei cacciaviti e le estremità dei saldatori. Altri oggetti realizzabili sono mostrati nella seguente figura:



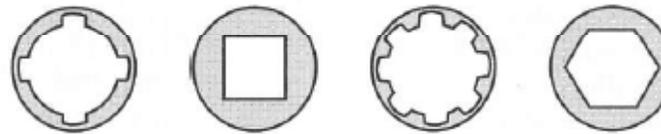
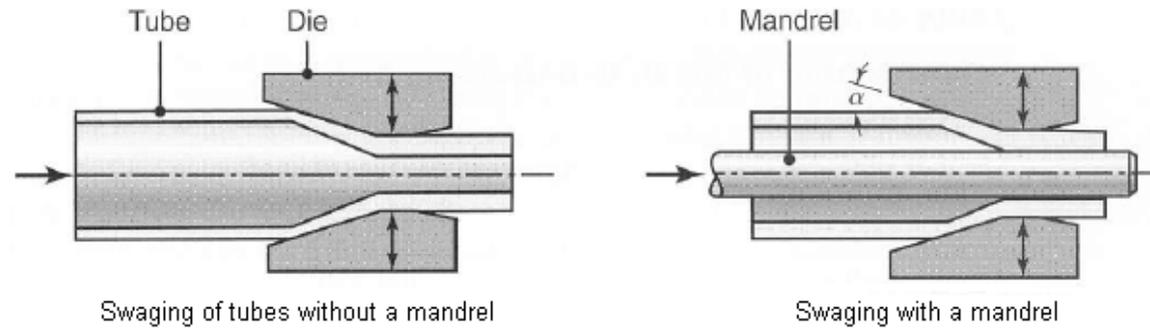
FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA

Il processo di forgiatura rotativa può essere utilizzato anche per assemblare componenti su cavi e fili: in questi casi si forgia un componente tubolare direttamente sul cavo.

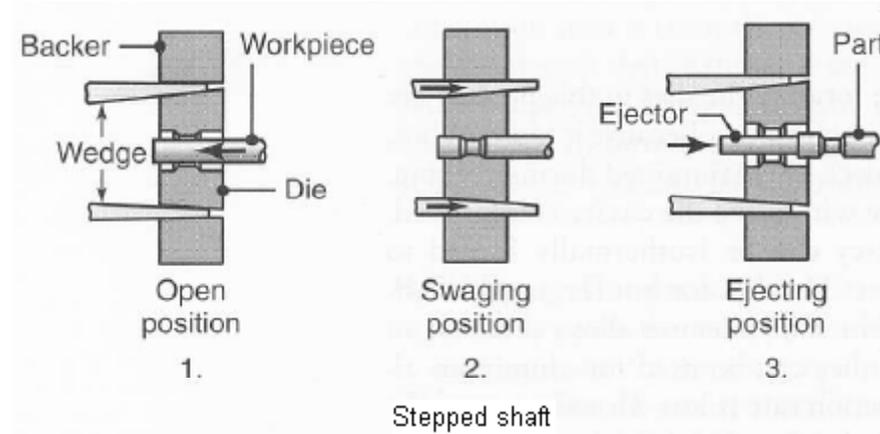
Le seguenti figure mostrano tre esempi di forgiatura rotativa: due sono relativi alla realizzazione di profili interni in elementi tubolari e il terzo alla realizzazione di alberi:



FORGIATURA: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI FORGIATURA



Examples of cross-scections



FORGIATURA:

CARATTERISTICHE GENERALI DEI PROCESSI DI FORGIATURA

Processo	Vantaggi	Svantaggi
Open die	Stampi semplici e poco costosi; ampia possibilità di realizzare componenti di varie dimensioni; utilizzato generalmente per quantità limitate.	Possibilità di realizzare forme semplici; difficoltà di mantenere strette tolleranze; è necessaria un'ulteriore lavorazione meccanica per ottenere la forma finale; non ottimale utilizzo di materiale; è necessario un alto livello di competenza.
Closed die	Buon utilizzo del materiale; proprietà migliori di quelle ottenibili con la forgiatura open-die; buona accuratezza dimensionale; elevati ratei di produzione; buona riproducibilità.	Costo elevato degli stampi; non conveniente per piccole quantità; sono spesso necessarie lavorazioni meccaniche aggiuntive.
Blocker	Stampi poco costosi; elevati ratei di produzione.	E' necessaria un'ulteriore lavorazione meccanica per ottenere la forma finale; si ottengono parti con corpi spessi e ampi raccordi.
Conventional	Richiede un minor numero di interventi successivi del processo blocker; elevati ratei di produzione; buon utilizzo del materiale.	Stampi più costosi di quelli del processo blocker.
Precision	Tolleranze dimensionali accurate; si ottengono parti con corpi sottili e raccordi ridotti; generalmente non sono necessarie lavorazioni meccaniche successive; utilizzo del materiale ottimale.	Elevate forze in gioco; stampi complessi; necessità di utensili per rimuovere il forgiato dagli stampi.



FORGIATURA: FORGIABILITA' DEI METALLI

Con il termine forgiabilità si intende la capacità di un materiale di subire una deformazione permanente senza la formazione di cricche.

Sono stati sviluppati diversi test per quantificare la forgiabilità. Quelli più utilizzati sono il test di ricalcatura (upsetting test) e il test di torsione a caldo (hot-twist test).

Nel test di ricalcatura un solido di forma cilindrica è compresso tra due stampi piani e si prende nota del valore della riduzione di altezza della barra alla quale avviene la prima frattura. Maggiore è la deformazione prima della rottura, maggiore è la forgiabilità del metallo.

Nel test di torsione a caldo un campione di forma circolare è sottoposto ad una torsione crescente fino alla rottura. Questa prova è effettuata su un determinato numero di provini a differenti temperature e si prende nota del numero di giri che ogni provino completa prima della rottura.



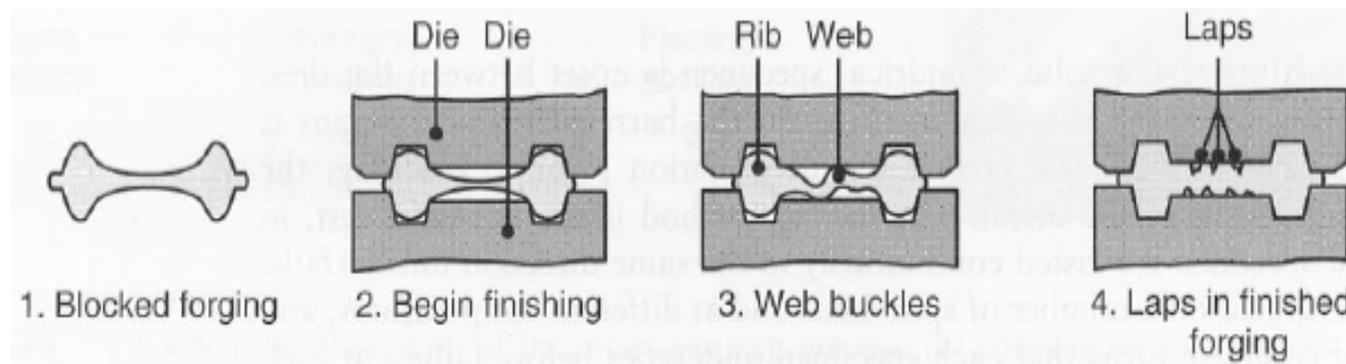
FORGIATURA: FORGIABILITA' DEI METALLI

Classificazione dei materiali in ordine decrescente di forgiabilità:

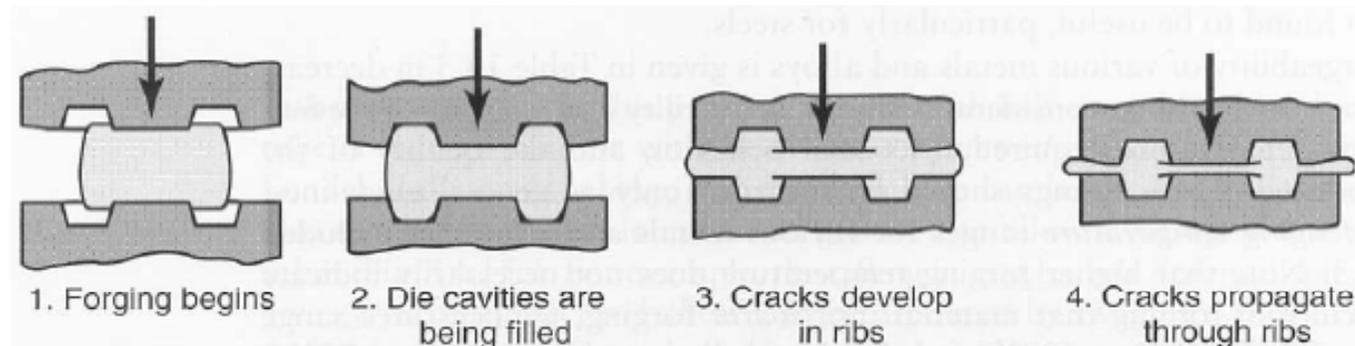
Classification of Metals in Decreasing Order of Forgeability	
Metal or alloy	Approximate range of hot-forging temperatures (°C)
Aluminum alloys	400–550
Magnesium alloys	250–350
Copper alloys	600–900
Carbon-and low-alloy steels	850–1150
Martensitic stainless steels	1100–1250
Austenitic stainless steels	1100–1250
Titanium alloys	700–950
Iron-based superalloys	1050–1180
Cobalt-based superalloys	1180–1250
Tantalum alloys	1050–1350
Molybdenum alloys	1150–1350
Nickel-based superalloys	1050–1200
Tungsten alloys	1200–1300

FORGIATURA: DIFETTI DI FORGIATURA

Il difetto più frequente è rappresentato dalle cricche superficiali, ma si può riscontrare anche buckling per instabilità a compressione, nel caso in cui il materiale non sia sufficiente a riempire completamente la cavità tra gli stampi.

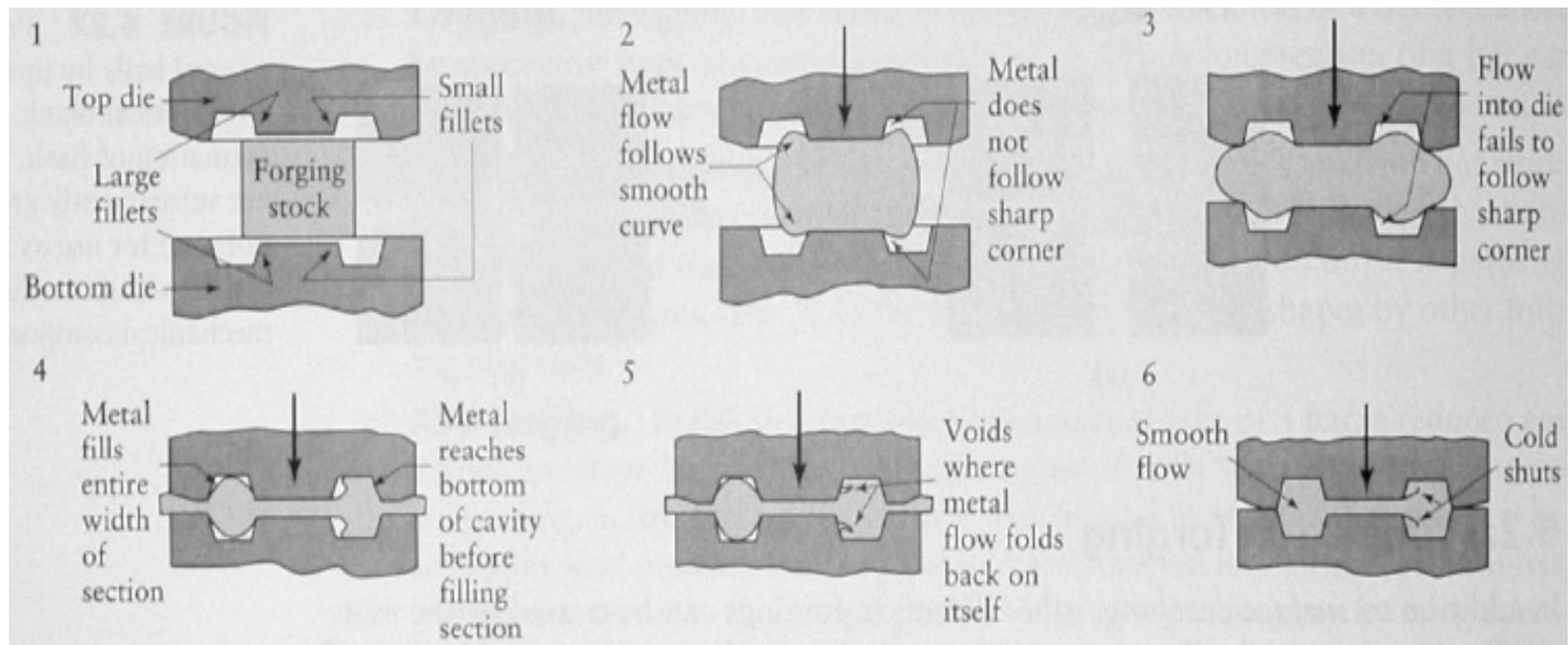


In caso di sezioni spesse e materiale sovrabbondante, si possono formare cricche interne dovute a flussi di materiale non voluti.



FORGIATURA: DIFETTI DI FORGIATURA

La presenza di raggi di curvatura troppo piccoli o spigoli vivi possono portare alla formazione di difetti per l'incapacità del materiale di seguire correttamente il profilo delineato dalla cavità: si generano, di conseguenza vuoti, che sono riempiti da flussi discontinui successivi (cold shuts).





FORGIATURA: DIFETTI DI FORGIATURA

Altri difetti interni possono nascere da:

- deformazione non uniforme del materiale nella cavità;
- gradienti di temperatura nel pezzo durante la lavorazione;
- modifiche della microstruttura dovute a trasformazioni di fase.

I difetti di forgiatura possono causare rottture per fatica, corrosione e usura durante la vita nell'ambiente operativo. E', dunque, di primaria importanza il controllo del danno prima della fase operativa (ciò riguarda soprattutto il mondo aerospaziale).



FORGIATURA: PROGETTAZIONE DEGLI STAMPI, MATERIALI, TEMPERATURE E LUBRIFICAZIONE

La progettazione degli stampi per forgiatura richiede notevole conoscenza ed esperienza sulla forma e la complessità del pezzo da realizzare, sulla sua duttilità, sulla sua resistenza, sulla sua sensibilità alla velocità di deformazione e alla temperature e, infine, sulle sue caratteristiche di dissipazione.

Nel caso di elevate forze in gioco, la distorsione dello stampo è un elemento da tenere presente, soprattutto quando sono richieste accurate tolleranze dimensionali.

Progettare uno stampo significa progettare anche la forma del semilavorato, le sue dimensioni e la quantità esatta di materiale da utilizzare.



FORGIATURA: PROGETTAZIONE DEGLI STAMPI, MATERIALI, TEMPERATURE E LUBRIFICAZIONE

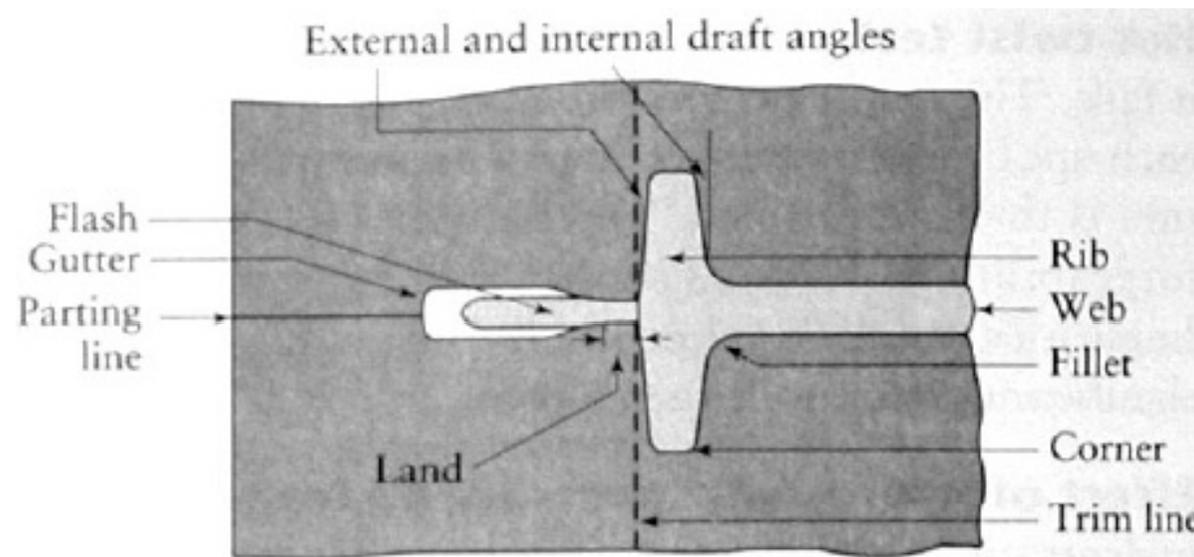
In molti casi è necessario prevedere delle fasi di forgiatura iniziali (per esempio edging o fullering) per ottenere una preforma adatta alla forgiatura finale nella forma complessa. Come fase finale può essere necessaria una finitura a pressioni maggiori in grado di definire il dettaglio.

La linea di congiunzione degli stampi può non essere orizzontale o rettilinea, ma deve essere localizzata nella zona che maggiormente facilita la rimozione del pezzo.

E' importante utilizzare angoli opportuni ($3^{\circ}\div 10^{\circ}$) per l'estrazione dei pezzi (*draft angles*).

FORGIATURA: PROGETTAZIONE DEGLI STAMPI, MATERIALI, TEMPERATURE E LUBRIFICAZIONE

La seguente figura mostra alcuni degli elementi che devono essere tenuti in maggiore considerazione:





FORGIATURA: PROGETTAZIONE DEGLI STAMPI, MATERIALI, TEMPERATURE E LUBRIFICAZIONE

I materiali per gli stampi devono essere in grado di operare ad elevate temperature. Di conseguenza, alcune delle principali caratteristiche richieste sono le seguenti:

- resistenza e tenacità ad elevate temperature;
- suscettibilità all'indurimento superficiale e capacità di indurirsi ad elevate temperature;
- resistenza a shock meccanici e termici;
- resistenza all'usura (in particolare abrasiva).

In genere, gli stampi vengono ricoperti con lubrificanti per evitare l'usura. Questi ultimi, però, hanno anche una funzione di barriera termica tra il pezzo caldo e lo stampo freddo e facilitano il distacco del forgiato. A caldo si utilizza grafite, disolfuro di molibdeno o vetro. A freddo oli minerali e saponi.



FORGIATURA: PROGETTAZIONE DEGLI STAMPI, MATERIALI, TEMPERATURE E LUBRIFICAZIONE

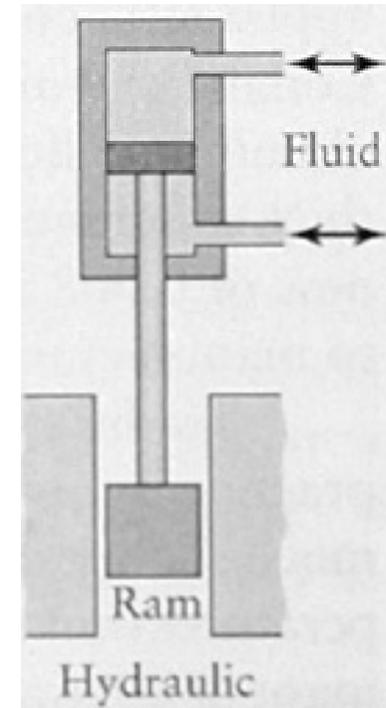
Le eventuali rotture degli stampi durante i processi di fabbricazione dei componenti sono dovute a una o più delle seguenti cause:

- progetto dello stampo errato;
- materiale difettoso o selezionato in modo improprio;
- operazioni di fabbricazione eseguite in modo non corretto;
- trattamenti termici e finitura non adatti;
- somministrazione di calore eccessiva (i cicli termici possono generare cricche);
- usura eccessiva;
- sovraccarichi;
- disallineamento dei componenti dello stampo rispetto ai loro movimenti;
- utilizzo non corretto dello stampo;
- movimentazione impropria dello stampo.

FORGIATURA: MACCHINE PER LA FORGIATURA

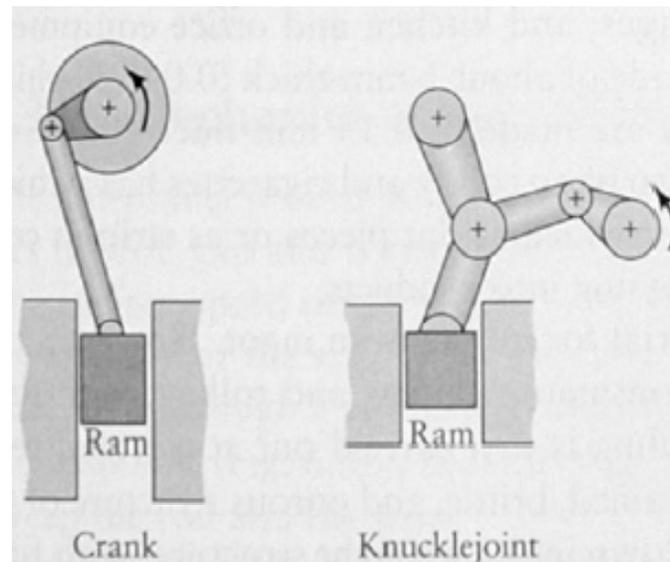
Il tipo di macchina da utilizzare per la forgiatura è scelto in base alla pressione massima da realizzare e alla velocità di lavoro e di incremento del carico. Le macchine più utilizzate sono le seguenti:

- **Pressa idraulica:**
 - opera a velocità costante e a carico limitato (si blocca quando il carico supera un limite prefissato);
 - permette pressioni elevate e basse velocità;
 - la forza massima applicata può raggiungere il valore di 82000 t;
 - principalmente utilizzata per Al, Mg, Be, bronzi e ottoni.



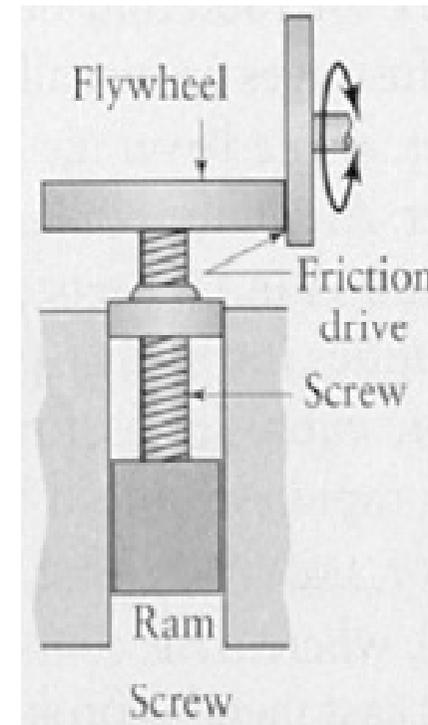
FORGIATURA: MACCHINE PER LA FORGIATURA

- **Pressa meccanica:**
 - opera a velocità maggiori della pressa idraulica, ma il carico è inferiore;
 - si può controllare lo spostamento massimo;
 - sono preferibili alle presse idrauliche per forgiare pezzi con elevata precisione;
 - la forza massima applicata può raggiungere il valore di 12000 t;
 - principalmente utilizzata per Al, Mg, Be, bronzi e ottoni.



FORGIATURA: MACCHINE PER LA FORGIATURA

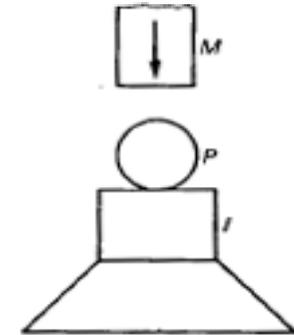
- **Pressa a vite:**
 - opera ad elevate pressioni ma la velocità è bassa;
 - è utilizzata per produrre componenti in quantità limitata e con elevata precisione (per esempio le palette delle turbine aeronautiche).
 - la forza massima applicata può raggiungere il valore di 31500 t;
 - principalmente utilizzata per Al, Mg, Be, bronzi e ottoni.



FORGIATURA: MACCHINE PER LA FORGIATURA

○ Maglio o martello:

- converte l'energia potenziale in energia cinetica;
- lavorano con energia di impatto (si possono raggiungere i 300 colpi al minuto);
- si accumula un'elevata energia cinetica in una mazza (M) che colpisce il blocco da lavorare (P), posto su un'incudine (I);
- l'energia può essere impressa alla mazza battente dalla forza di gravità nella caduta libera dopo il sollevamento a una data altezza eseguito con mezzi meccanici, o con l'azione di un gas o vapore in pressione, oppure tramite la spinta di un fluido in pressione, per ottenere un'energia cinetica maggiore di quella corrispondente alla caduta libera dal punto più alto della corsa disponibile;
- la massima energia raggiungibile è pari a 1200 kJ;
- principalmente utilizzato per Cu, Ti, acciai e leghe refrattarie.

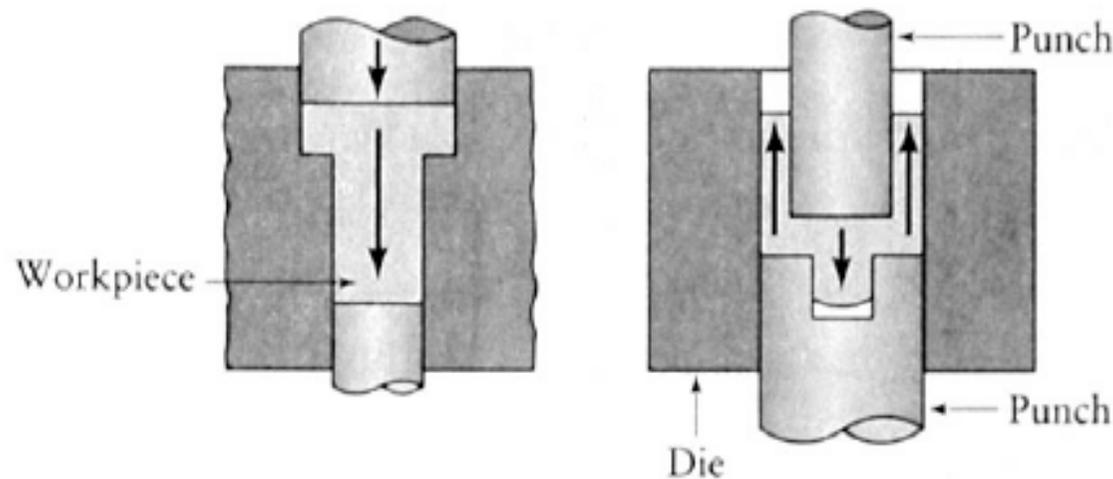


In genere, si utilizzano presse per Al, Mg, Be, bronzi e ottoni, mentre si preferiscono magli per Cu, Ti, acciai e leghe refrattarie.

ESTRUSIONE

L'estrusione è un processo di lavorazione per deformazione plastica sviluppato nel 1700 , nel corso degli anni ha ottenuto un grande successo nella produzione di semilavorati di geometria particolare.

Questa lavorazione può essere effettuata a caldo o a freddo, a seconda della duttilità del materiale.





ESTRUSIONE

L'estrusione ad elevate temperature (*hot extrusion*) richiede particolari accorgimenti come il preriscaldamento dello stampo per evitare che l'eccessivo raffreddamento della billetta nel contenitore provochi deformazioni non uniformi nel pezzo. Inoltre la billetta può sviluppare film di ossido che possono essere abrasivi e possono modificare il flusso del materiale.

L'estrusione a temperatura ambiente (*cold extrusion*) è spesso legata ad operazioni di forgiatura e provoca sforzi molto elevati su utensili e stampi. La lubrificazione è molto importante e si usano rivestimenti solfati, saponi o cere.



ESTRUSIONE

I vantaggi dell'estrusione a freddo, rispetto all'estrusione a caldo, sono i seguenti:

- proprietà meccaniche elevate come risultato dell'incrudimento a freddo;
- buon controllo delle tolleranze dimensionali con poche operazioni di finitura;
- superfici con buona finitura;
- assenza di ossidi superficiali;
- alta produttività.

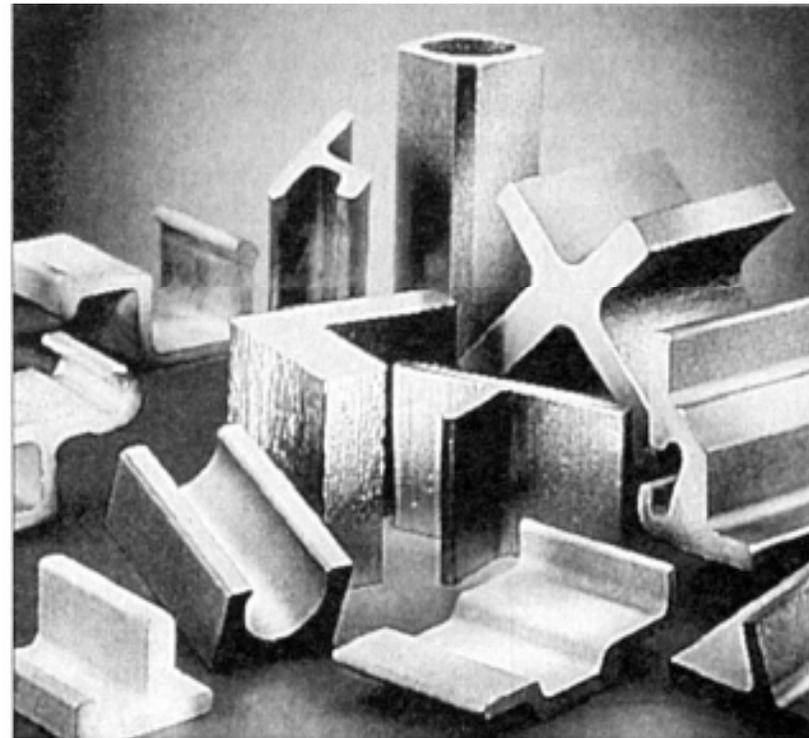
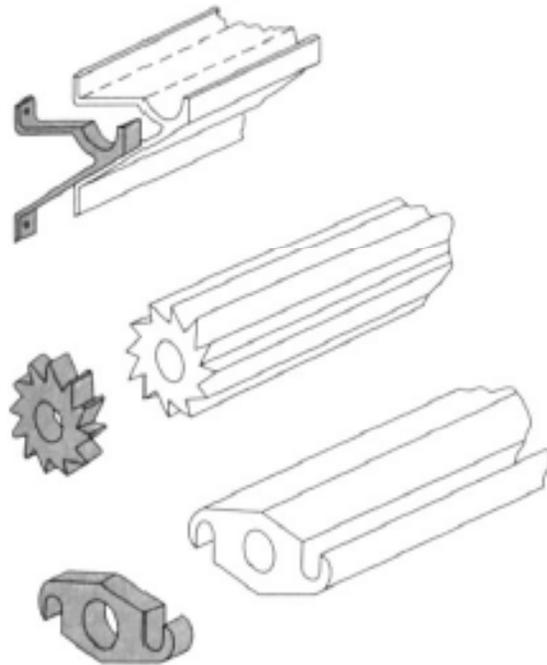
Poiché si parte da una billetta, il processo non è continuo, in quanto si deve fare in modo che essa sia contenuta nella camera.

Si producono porte scorrevoli, telai per finestre, tubi con diverse sezioni, scale in alluminio, componenti per aerei, automobili, biciclette, motocicli, macchine da trasporto, ecc.

L'estrusione può essere conveniente sia per grandi produzioni sia per produzioni ridotte.

ESTRUSIONE

Le seguenti figure mostrano alcuni tipi di geometrie realizzabili:

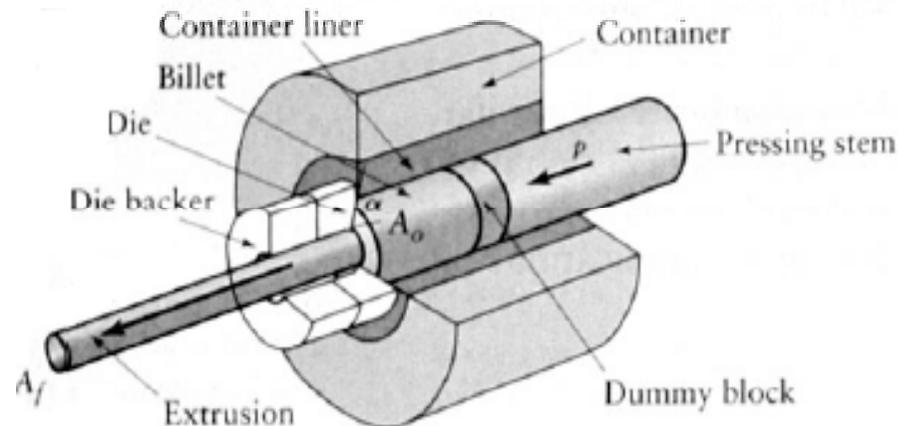


ESTRUSIONE: PRINCIPALI TIPOLOGIE DI ESTRUSIONE

Le principali tipologie di estrusione sono le seguenti:

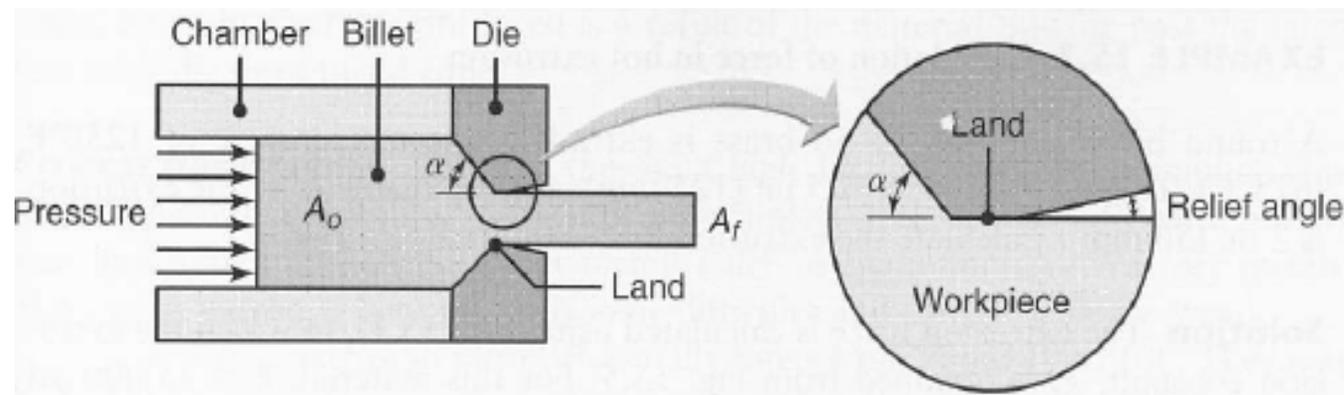
○ **Estrusione diretta:**

- una billetta è posta in un contenitore (camera) ed è forzata a passare attraverso l'apertura di uno stampo per mezzo di un pistone idraulico;
- l'apertura dello stampo può essere circolare o di geometria complessa;
- si utilizza un utensile aggiuntivo (*dummy block*) per proteggere l'estremità del pistone, soprattutto nel processo di estrusione a caldo;



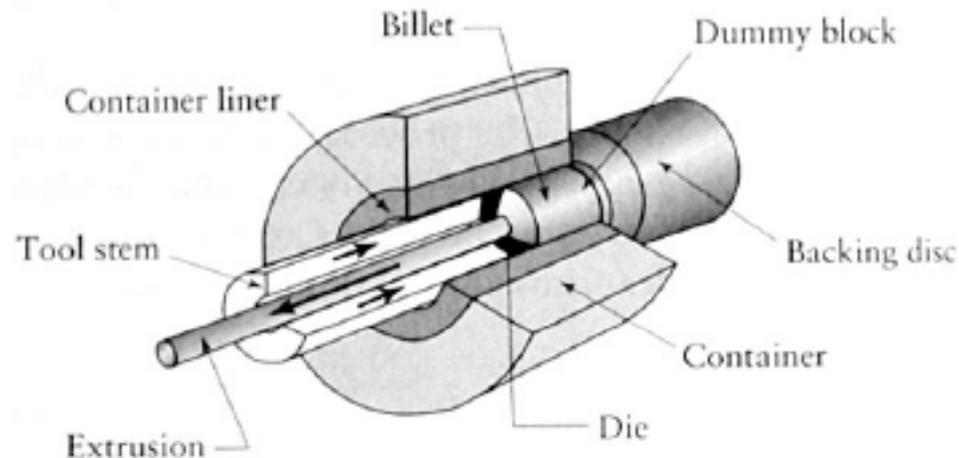
ESTRUSIONE: PRINCIPALI TIPOLOGIE DI ESTRUSIONE

- l'attrito della billetta lungo le pareti del contenitore fa aumentare molto le forze richieste per l'estrusione.
- le variabili geometriche sono l'angolo dello stampo α , il rapporto tra l'area della sezione della billetta e quella del prodotto finale, la temperatura della billetta, la velocità del pistone e il tipo di lubrificante utilizzato.



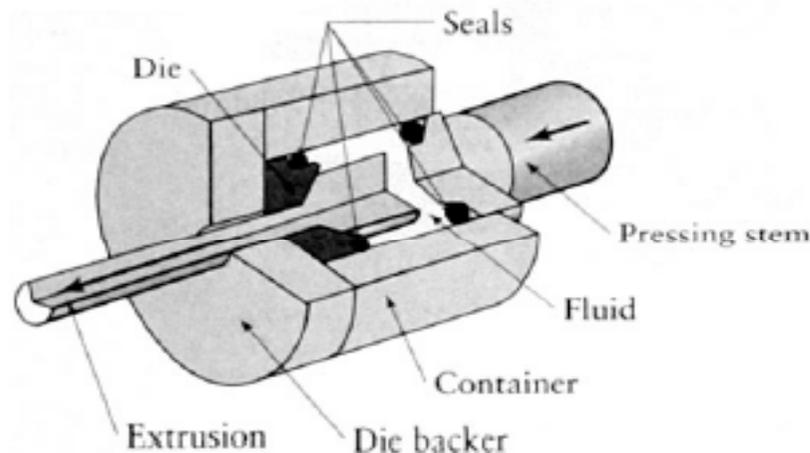
ESTRUSIONE: PRINCIPALI TIPOLOGIE DI ESTRUSIONE

- **Estrusione indiretta (o inversa):**
 - è un processo simile al precedente, ma, in questo caso, la parte mobile è lo stampo che si muove verso la billetta;
 - l'attrito è limitato, ma le pressioni applicabili sono inferiori a causa dell'utilizzo di un pistone cavo.



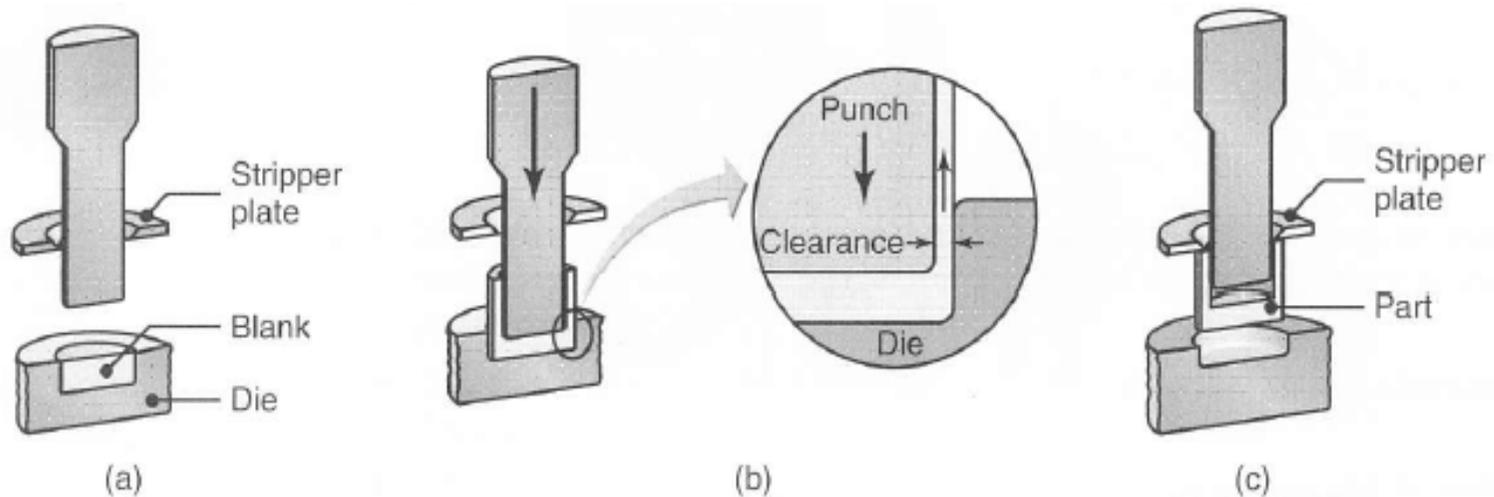
ESTRUSIONE: PRINCIPALI TIPOLOGIE DI ESTRUSIONE

- **Estrusione idrostatica:**
 - la billetta ha un diametro inferiore a quello del contenitore, che è riempito di fluido;
 - non si ha attrito tra la billetta e le pareti della camera;
 - non è largamente utilizzata a livello industriale a causa della complessità del sistema di tenuta;
 - come fluidi si utilizzano, a bassa temperatura, oli vegetali e cere e, ad alta temperatura, polimeri o vetri.



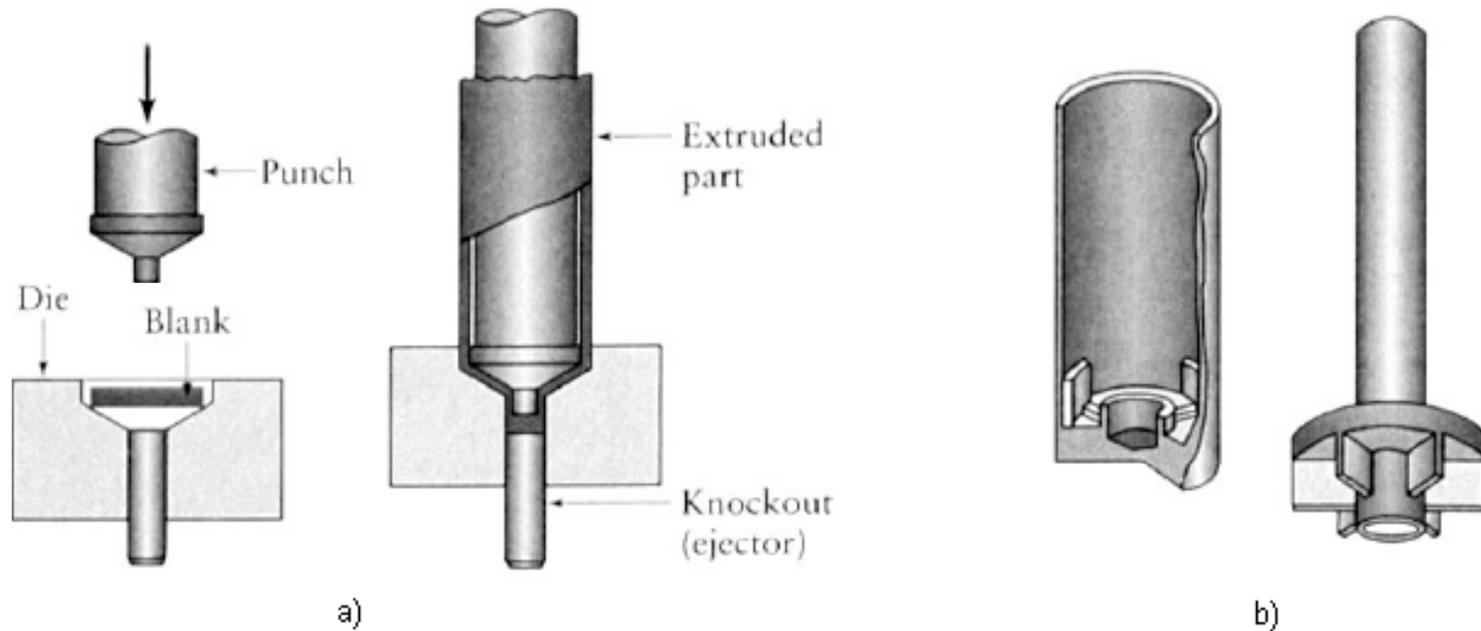
ESTRUSIONE: PRINCIPALI TIPOLOGIE DI ESTRUSIONE

- **Estrusione a impatto:**
 - è un processo simile all'estrusione inversa e spesso è incluso nella categoria denominata estrusione a freddo;
 - un martello colpisce rapidamente il blocco da lavorare, che è estruso in direzione opposta;
 - a causa della costanza del volume del materiale, lo spessore della sezione del prodotto finale è funzione della distanza tra il martello e lo stampo;



ESTRUSIONE: PRINCIPALI TIPOLOGIE DI ESTRUSIONE

- le seguenti figure mostrano la produzione di un tubetto di dentifricio (figura a) e di altri prodotti realizzabili per estrusione (figura b):

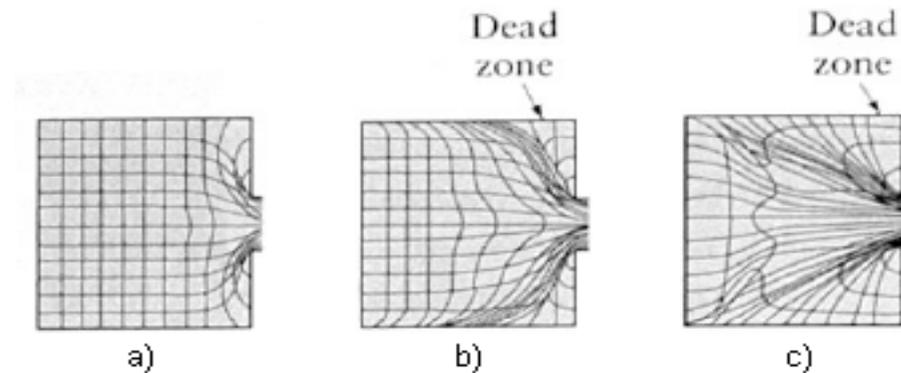


ESTRUSIONE: FLUSSO DI MATERIALE NELL'ESTRUSIONE

Come per tutte le lavorazioni per deformazione plastica, il flusso di materiale è molto importante anche nell'estrusione poiché influenza la qualità e le proprietà meccaniche del prodotto finale.

Il materiale scorre in senso longitudinale in modo simile ad un fluido incomprimibile che si muove in un canale. Di conseguenza, il prodotto finale presenta grani cristallini molto allungati (esistono delle orientazioni preferenziali).

Tipiche mappe di flusso del materiale sono mostrate nella seguente figura:





ESTRUSIONE: FLUSSO DI MATERIALE NELL'ESTRUSIONE

- Figura a): flusso di metallo omogeneo; avviene nel caso di assenza di attrito tra billetta, stampo e contenitore.
- Figura b): nel caso in cui l'attrito sia elevato, si sviluppa una zona morta (*dead zone*) in prossimità degli angoli della camera; si generano difetti interni.
- Figura c): in presenza di un attrito elevatissimo tra la billetta e il contenitore, la zona morta si estende in direzione opposta al moto; se l'estrusione avviene a caldo si ha anche la formazione di un gradiente di temperatura con generazione difetti a tubo.



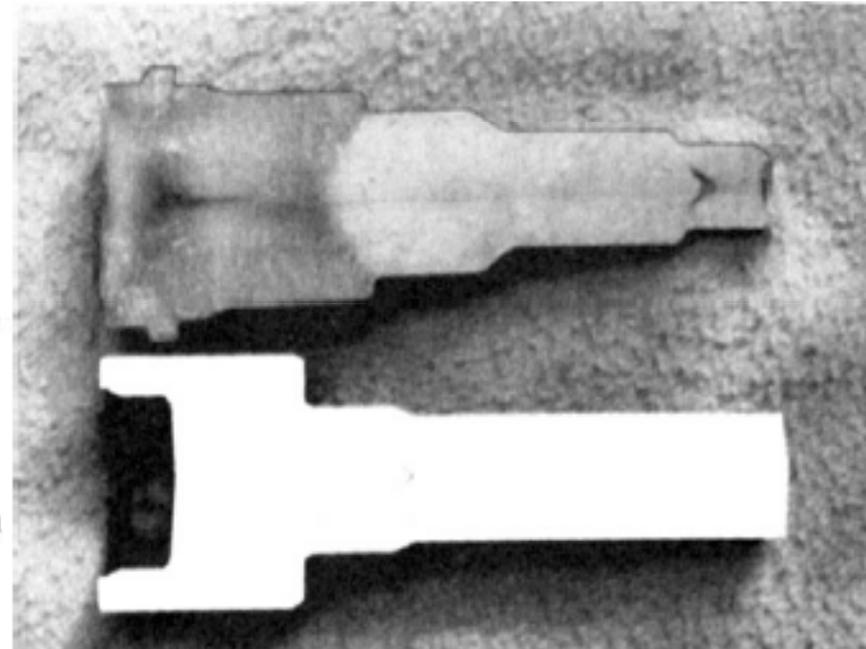
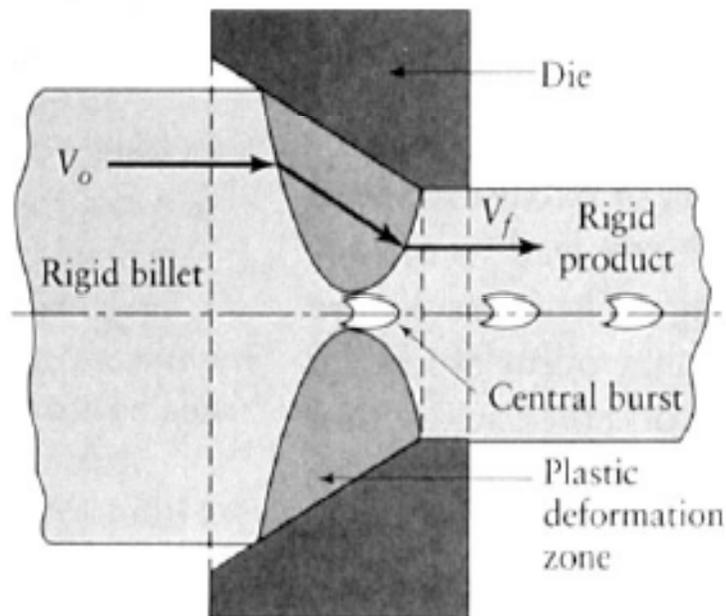
ESTRUSIONE: DIFETTI DI ESTRUSIONE

I difetti generati nel materiale dal processo di estrusione possono essere raggruppati nelle seguenti categorie:

- **Cricche superficiali:**
 - sono generate da velocità troppo elevate e locali aumenti di temperatura;
 - per limitare le cricche si possono ridurre questi due parametri oppure utilizzare un lubrificante migliore;
 - tipicamente di formano difetti "a bamboo" in cui il materiale rimane bloccato per attrito alle pareti e rilasciato a scatti.
- **Cavità:**
 - si tratta di inclusioni di ossidi e impurità che vengono inglobati e indirizzati verso il centro del pezzo dal flusso del materiale;
 - possono essere limitate rendendo più uniforme il flusso del materiale, controllando l'attrito, riducendo i gradienti di temperatura oppure lavorando preliminarmente la superficie della billetta per eliminare le impurità.

ESTRUSIONE: DIFETTI DI ESTRUSIONE

- **Cricche interne:**
 - nascono da deformazioni non omogenee;
 - possono essere limitate aumentando l'attrito e diminuendo l'angolo alla matrice.





ESTRUSIONE: OPERAZIONI DI ESTRUSIONE

Si estrudono diversi tipi di materiale con velocità tipiche del pistone che arrivano a 0.5 m/s. Si preferiscono velocità inferiori per leghe bassofondenti più duttili come le leghe di Al, Mg e Cu. Si lavora a velocità per acciai e metalli refrattari (come il Mo).

Si utilizzano presse idrauliche orizzontali per l'estrusione a caldo e verticali per l'estrusione a freddo.

Nell'estrusione a caldo si lavora alle temperature della forgiatura a caldo. La billetta viene riscaldata prima dell'inserimento nell'estrusore. Il raffreddamento della billetta nel contenitore aumenta le deformazioni non omogenee. Inoltre, l'ossido formato a caldo può essere eliminato utilizzando un tampone pressatore di diametro leggermente inferiore a quello del pezzo.



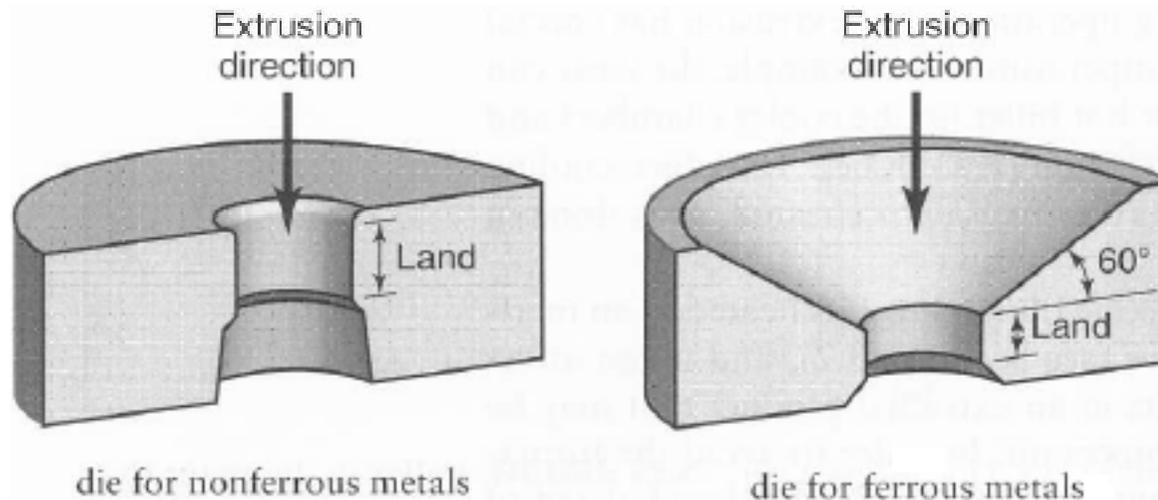
ESTRUSIONE: OPERAZIONI DI ESTRUSIONE

Per quanto riguarda la lubrificazione, nell'estrusione a caldo per acciai e metalli refrattari si utilizza il vetro che mantiene una buona viscosità ad alta temperatura e agisce da barriera termica, oppure si utilizza grafite o disolfuro di molibdeno. Per leghe non ferrose si utilizza la grafite. Se si hanno problemi di adesione al contenitore si utilizza una camicia di materiale soffice come il rame (*canning*).

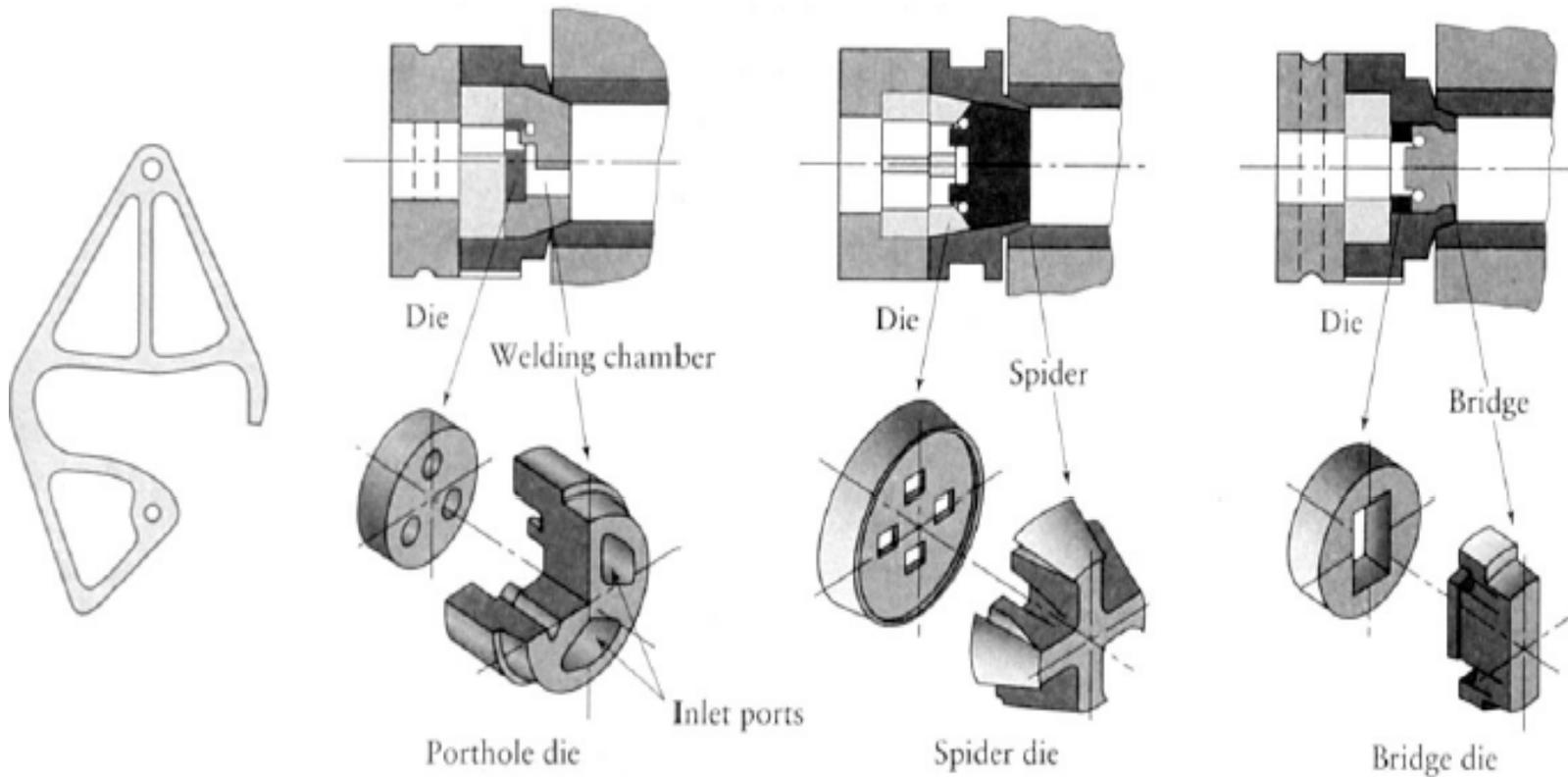
Per l'estrusione di tubi si interpone un mandrino.

ESTRUSIONE: PROGETTAZIONE DEGLI STAMPI

La progettazione degli stampi richiede una notevole esperienza. Le seguenti figure mostrano alcuni tipi di stampi realizzabili:



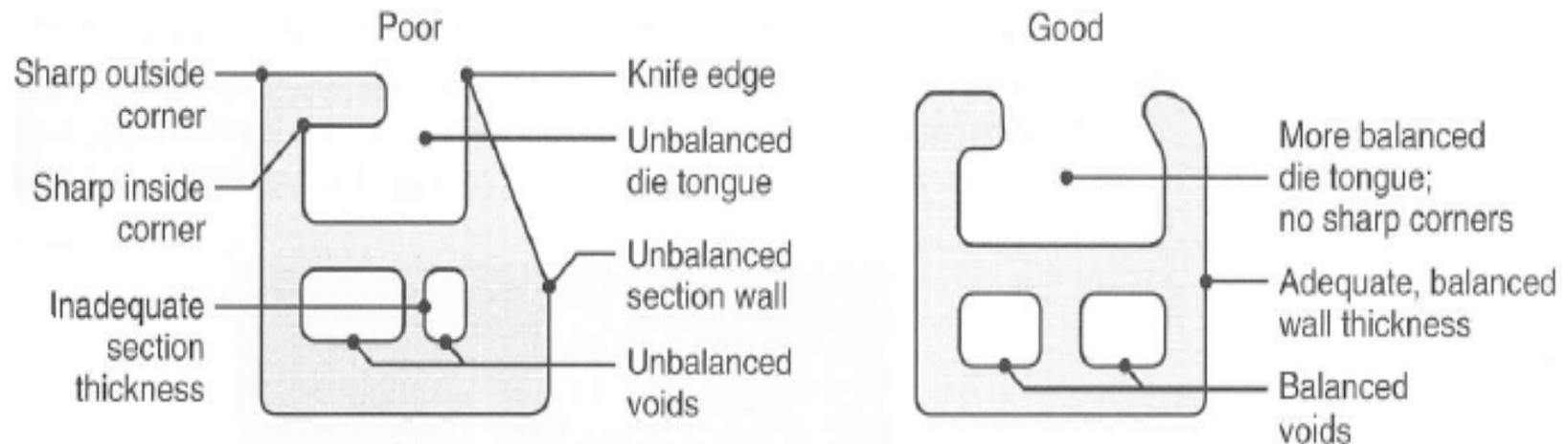
ESTRUSIONE: PROGETTAZIONE DEGLI STAMPI



ESTRUSIONE: PROGETTAZIONE DEGLI STAMPI

Le linee guida più importanti da tenere in considerazione, mostrate nella figura che segue, sono:

- simmetria della sezione;
- assenza di angoli appuntiti;
- assenza di cambi repentini nelle dimensioni dello stampo.

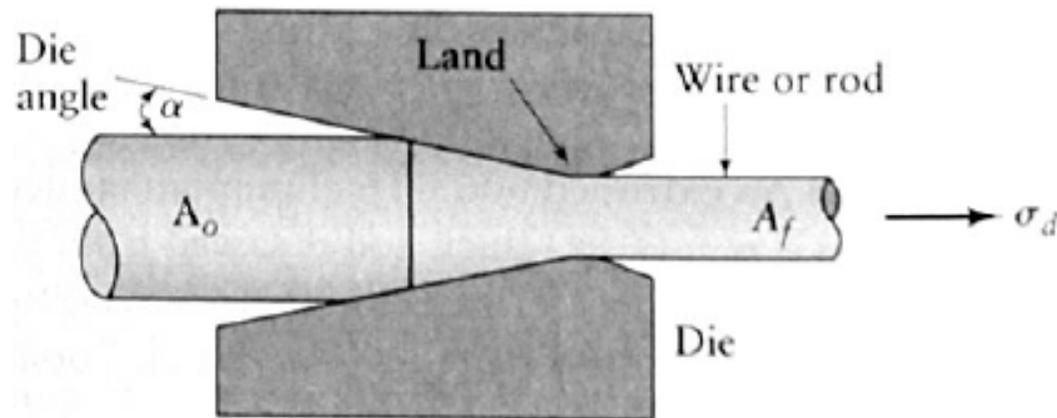


TRAFILATURA

La trafilatura è un processo simile all'estrusione, ma, in questo caso, il materiale è tirato all'uscita e in esso si sviluppano sforzi di trazione.

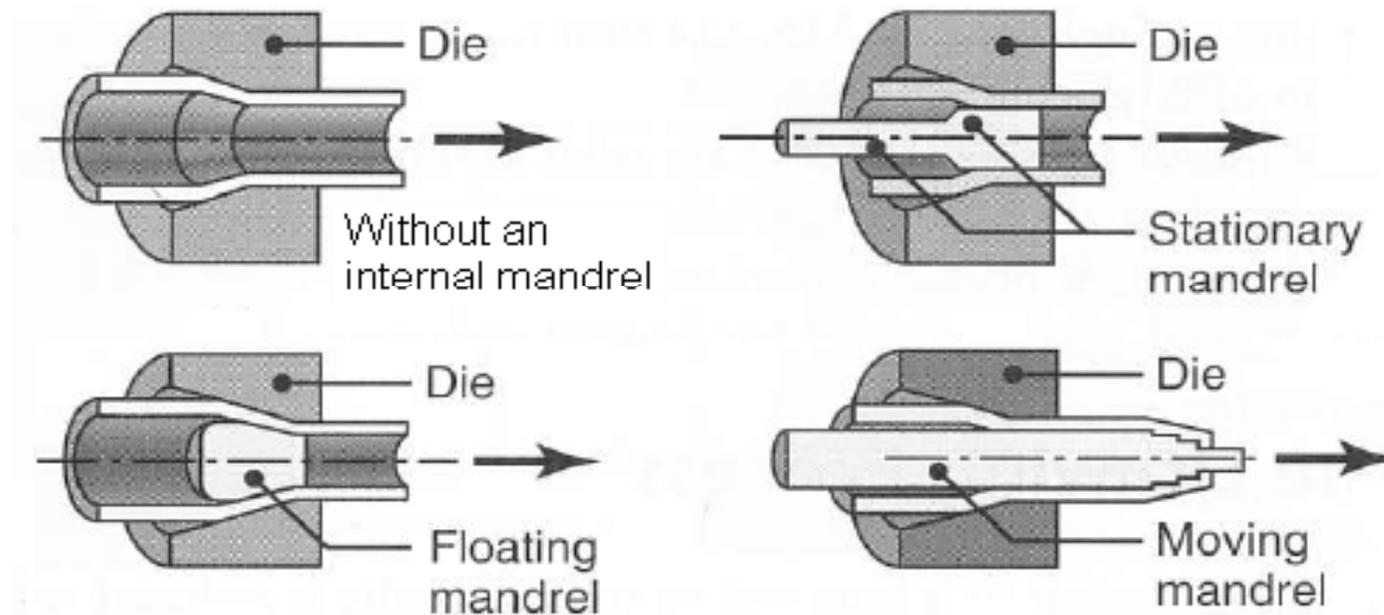
Si producono alberi, piccoli pistoni, cilindri, tubi, fili, materiale che rivetti e bulloni, ecc. Per i fili metallici si arriva a 0.025 mm in diametro.

Le variabili tipiche della trafilatura sono simili a quelle dell'estrusione:



TRAFILATURA

Lo spessore o il diametro dei tubi prodotti per estrusione sono ulteriormente ridotti nella trafilatura anche tramite l'utilizzo di un mandrino di forma opportuna, a seconda del tipo di tubo che si vuole ottenere:





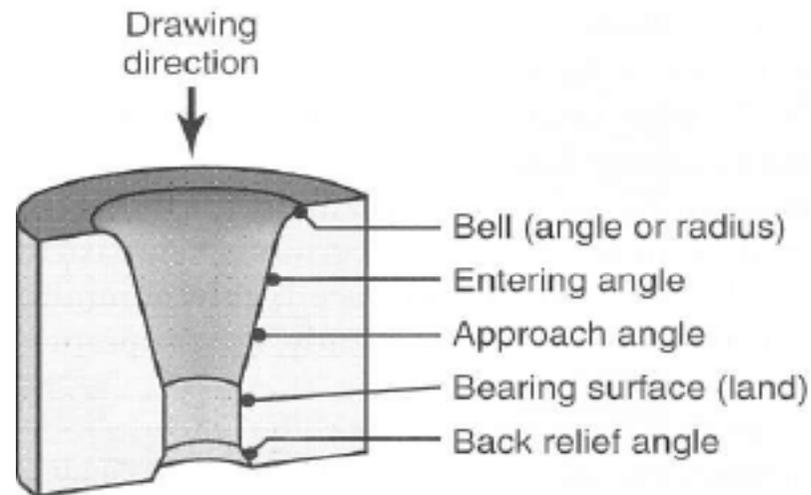
TRAFILATURA: DIFETTI NELLA TRAFILATURA

I difetti osservati nella trafilatura sono simili a quelli dell'estrusione. In particolare si possono generare:

- **Cricche interne centrali:**
 - aumentano all'aumentare dell'angolo di trafilatura o al diminuire della riduzione per passata;
 - in entrambi i casi aumenta la deformazione non omogenea.
- **Striature, piegature o cricche longitudinali in superficie:**
 - possono aumentare in dimensione in seguito a successive lavorazioni;
 - per limitarle si devono controllare i parametri di lavorazione e la lubrificazione.
- **Sforzi residui:**
 - sono generati da deformazioni non omogenee.

TRAFILATURA: OPERAZIONI DI TRAFILATURA

La terminologia tipica per uno stampo da trafilatura è mostrata nella seguente figura:



Gli angoli tipici variano tra 6° e 15° .

Non si praticano riduzioni di sezione maggiori del 45% per evitare l'insorgere di fratture. Le riduzioni di sezioni inferiori al 10% sono praticate per migliorare la finitura superficiale e le tolleranze dimensionali.



TRAFILATURA: OPERAZIONI DI TRAFILATURA

Non si praticano riduzioni di sezione maggiori del 45% per evitare l'insorgere di fratture. Le riduzioni di sezioni inferiori al 10% sono praticate per migliorare la finitura superficiale e le tolleranze dimensionali.

Le velocità di trafilatura variano tra 0.15 m/s a 50 m/s a seconda del diametro finale desiderato.

I fili possono essere resi dritti facendoli passare in flessione attraverso più filiere disallineate (come nei rulli livellanti nella laminazione).

Le sezioni di dimensioni maggiori vengono trafilate a temperature elevate.

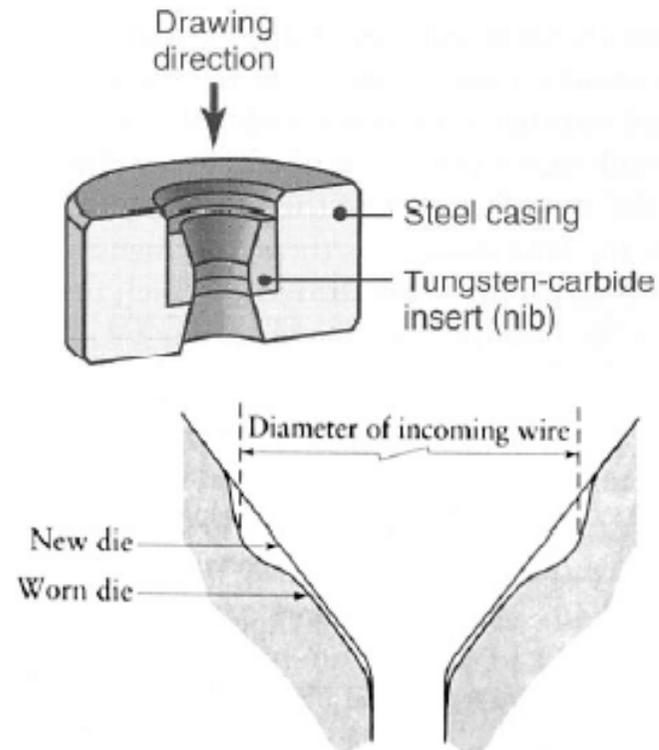
La trafilatura a freddo incrudisce il materiale.

TRAFILATURA: OPERAZIONI DI TRAFILATURA

Nel caso di cavi si utilizza una procedura chiamata **bundle drawing**: si trafilano più fili insieme e si avvolgono in un unico cavo; per prevenire l'incollaggio tra un filo e l'altro si inserisce un materiale polimerico che ha anche una funzione protettiva.

Negli stampi in acciaio si possono utilizzare inserti in carburo di tungsteno o in diamante, che hanno bassi valori di tenacità.

L'usura maggiore nelle matrici avviene in corrispondenza della prima zona di contatto con il pezzo.





TRAFILATURA: OPERAZIONI DI TRAFILATURA

In base al tipo di lubrificazione di possono distinguere due tipi di trafilatura:

- **Trafilatura a secco:**
 - si rimuove l'ossido superficiale per attacco chimico;
 - in seguito il materiale passa attraverso un bagno di sapone in polvere prima di entrare nella filiera;
 - nel caso di metalli ad alta resistenza (acciai) si riveste il filo o la barra con metalli duttili (rame o stagno);
 - per il titanio si utilizzano i polimeri.

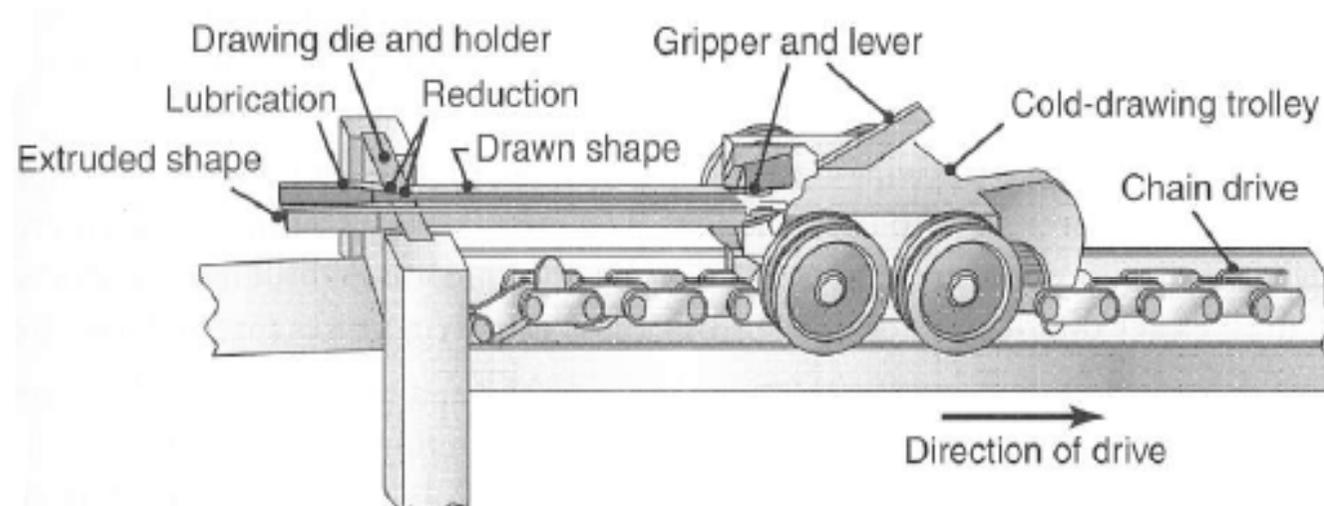
- **Trafilatura in umido:**
 - il pezzo e la matrice sono completamente immersi nel lubrificante (oli o emulsioni) durante la trafilatura.

Per ridurre ulteriormente l'usura, migliorare la finitura superficiale e permettere alte riduzioni di sezione per passata si possono utilizzare anche gli ultrasuoni.

TRAFILATURA: MACCHINE PER TRAFILATURA

Per mettere in trazione e trafilare i pezzi si utilizzano due tipi di macchinari:

- **Banchi da trafilatura:**
 - sono simili alle macchine per trazione orizzontale;
 - si utilizzano sistemi idraulici per sezioni molto grandi, che richiedono carichi elevati;
 - si possono trafilare pezzi con una lunghezza massima di 30 m.



TRAFILATURA: MACCHINE PER TRAFILATURA

- **Bull blocks:**
 - sono rulli avvolgitori motorizzati che avvolgono fili trafilati e applicano la trazione necessaria per la trafilatura.

