



Tecnologie delle Costruzioni Aerospaziali

LAVORAZIONI PER DEFORMAZIONE PLASTICA

PARTE 1

**Prof. Claudio Scarponi
Ing. Carlo Andreotti**



CLASSIFICAZIONE DEI PROCESSI DI LAVORAZIONE PER DEFORMAZIONE PLASTICA DEI METALLI

I processi di lavorazione industriale per la produzione di prodotti finiti e di semilavorati, si basano sulla proprietà dei metalli di poter subire deformazioni permanenti di notevole entità senza pericolo di rottura o deterioramento, anzi con un miglioramento delle proprietà di resistenza meccanica.

I processi di formatura per deformazione si suddividono in base a:

- **Temperatura:** deformazione a freddo, a media temperatura e ad alta temperatura (a caldo).
- **Tipo di lavorazione:** lavorazione primaria (producono il semilavorato dal lingotto) e secondaria (portano al pezzo nella forma finale).
- **Dimensioni e forma del pezzo:** deformazioni di volume (bulk deformation), formatura della lamiera (sheet forming).



CLASSIFICAZIONE DEI PROCESSI DI LAVORAZIONE PER DEFORMAZIONE PLASTICA DEI METALLI

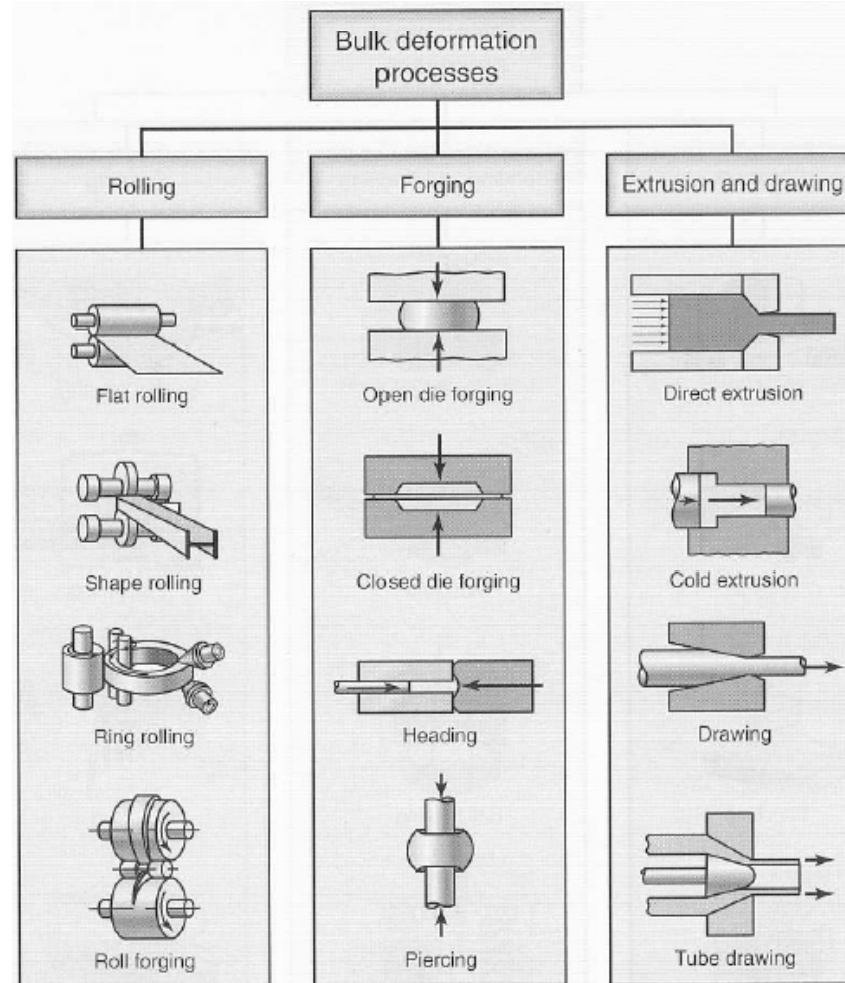
In generale, i processi di lavorazione per deformazione di volume possono essere classificati nel modo seguente:

- **Laminazione.**
- **Forgiatura.**
- **Estrusione.**
- **Trafilatura.**

Un discorso a parte va fatto per l'**imbutitura** che riguarda la lavorazione delle lamiere.

CLASSIFICAZIONE DEI PROCESSI DI LAVORAZIONE PER DEFORMAZIONE PLASTICA DEI METALLI

Diversi tipi di lavorazione per deformazione plastica:





LAMINAZIONE

La laminazione è un processo di riduzione dello spessore o di modifica della sezione di un pezzo attraverso la pressione applicata tramite due **rulli rotanti**, che costituiscono il **laminatoio**.

Questo processo, che rappresenta circa il 90% dei processi di lavorazione per deformazione plastica, è stato sviluppato alla fine del 1500.

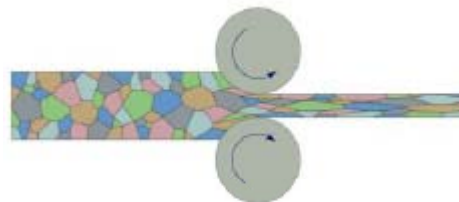
Il materiale di partenza è un semilavorato generato da una fusione continua, anche detto lingotto.

LAMINAZIONE

In generale, con la laminazione si producono due di laminati:

- **piastre**, con spessore compreso tra 6 mm e 300 mm (a seconda del tipo di utilizzo finale);
- **fogli o lamiere**, con spessore inferiore a 6 mm (utilizzati soprattutto nel campo automobilistico e aerospaziale).

Inizialmente la laminazione è effettuata ad elevate temperature (*hot rolling*). Durante questo processo, la microstruttura fragile e porosa del lingotto si modifica in una struttura con dimensione dei grani più fine e con proprietà meccaniche migliori come resistenza e durezza.



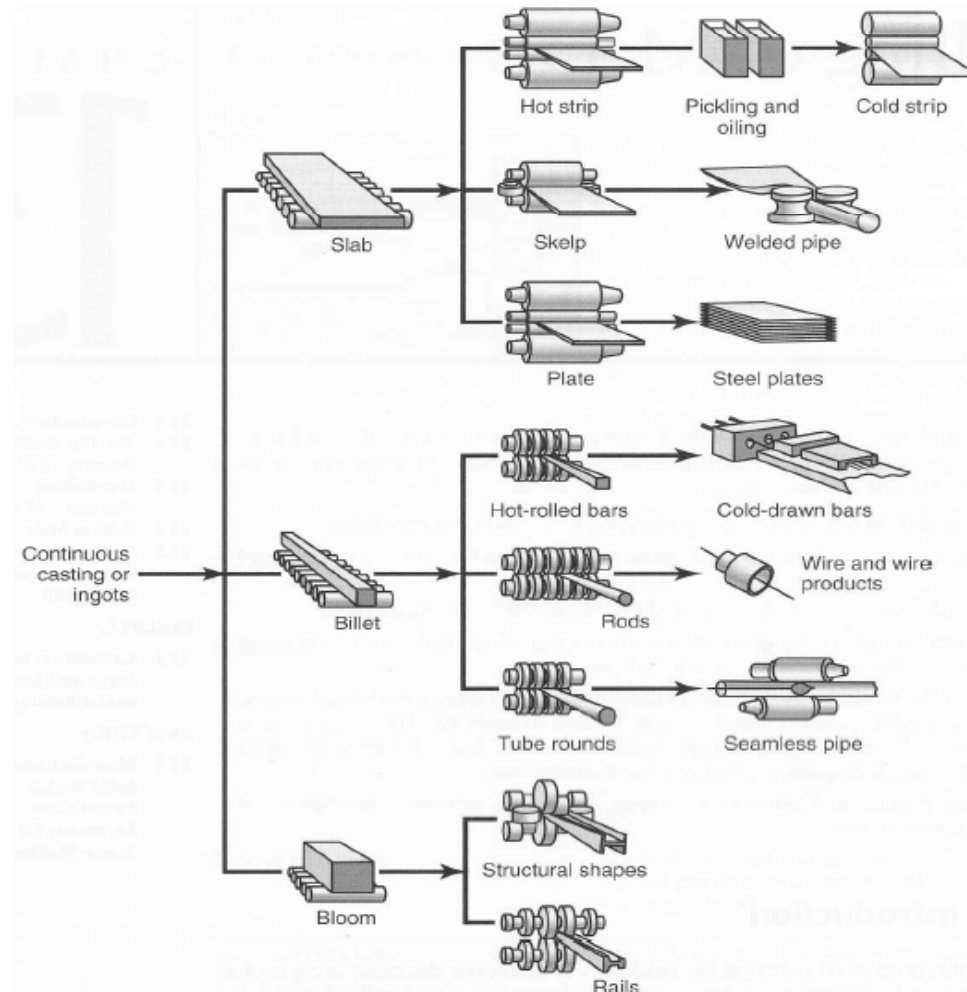


LAMINAZIONE

In seguito, si effettua una laminazione a temperatura ambiente (*cold rolling*), attraverso la quale il prodotto assume resistenza e durezza più elevate e una migliore finitura superficiale. Tuttavia, questo processo richiede un'energia maggiore (la resistenza del materiale è più elevata a temperatura ambiente) e conduce ad un prodotto con proprietà di anisotropia (dovute alle orientazioni preferenziali dei grani cristallini).

LAMINAZIONE

Principali tipologie di laminazione:

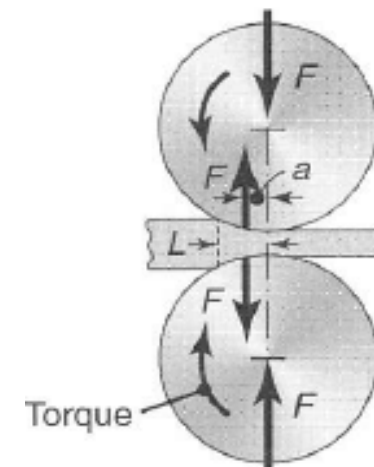
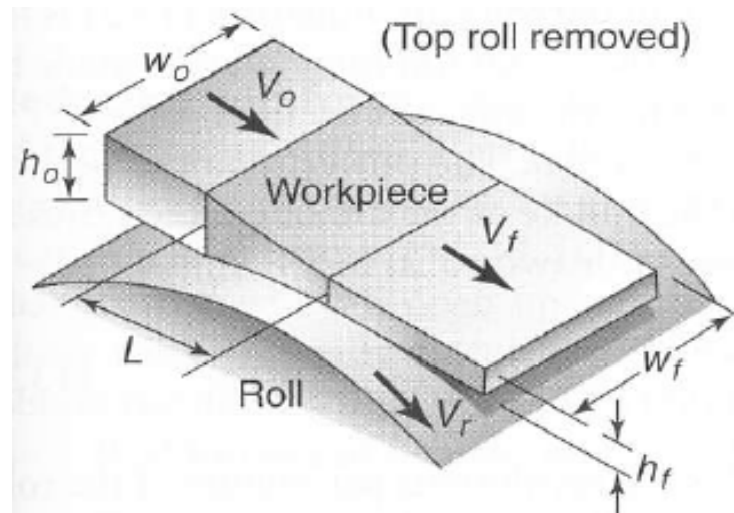


Materiale curato da:
Ing. Carlo Andreotti

Tecnologie delle Costruzioni
Aerospaziali

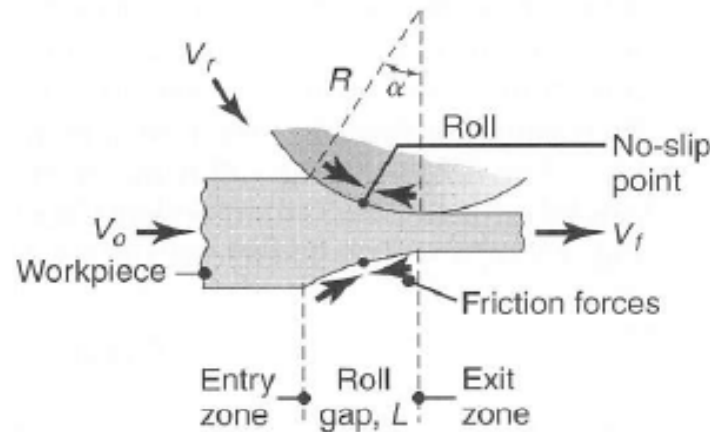
LAMINAZIONE: PROCESSO DI LAMINAZIONE PIANA

Il pezzo in lavorazione, di spessore iniziale h_0 , entra nello spazio delineato tra i due rulli con una velocità iniziale V_0 . Nella fase centrale la velocità è pari a quella periferica, V_r , dei rulli, ognuno azionato da un motore elettrico. All'uscita il pezzo ha uno spessore finale h_f e una velocità finale V_f , che soddisfa la relazione $V_0 < V_r < V_f$.



LAMINAZIONE: PROCESSO DI LAMINAZIONE PIANA

Poiché la velocità periferica dei rulli è costante, si verifica uno scorrimento relativo tra il rullo e il pezzo in lavorazione lungo l'arco di contatto. In un solo punto, chiamato punto neutrale, le velocità del pezzo e del rullo sono uguali. A sinistra del punto neutrale il rullo si muove con velocità maggiore del pezzo in lavorazione; il contrario avviene nella parte destra. Di conseguenza, nascono delle forze d'attrito che dissipano energia (per ridurre queste forze si usano, in genere, i lubrificanti).





LAMINAZIONE: PROCESSO DI LAMINAZIONE PIANA

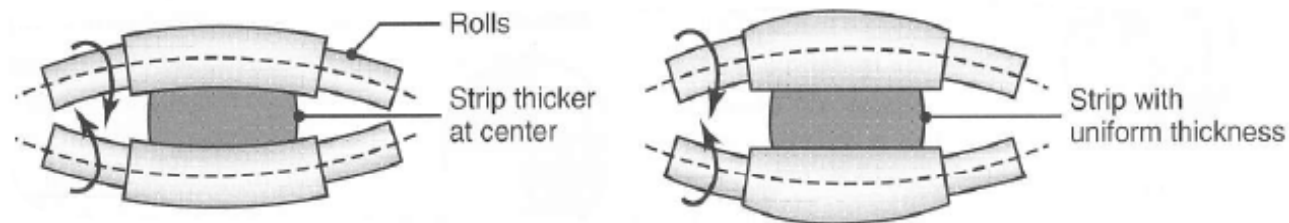
Durante la laminazione, le forze applicate possono generare elevate deformazioni dei rulli. Tuttavia si possono utilizzare alcuni accorgimenti per ridurre le forze applicate:

- riduzione dell'attrito all'interfaccia rullo – pezzo in lavorazione;
- utilizzo di rulli con diametro limitato per ridurre l'area di contatto;
- basse riduzioni di spessore per ogni passata;
- innalzamento della temperatura di lavorazione per ridurre la resistenza del materiale;
- applicazione di tensioni longitudinali sul pezzo in lavorazione.

LAMINAZIONE: CONSIDERAZIONI GEOMETRICHE

A causa delle forze agenti durante la lavorazione, i rulli sono soggetti a cambiamenti di forma. Infatti, se una barra si inflette a seguito dell'applicazione di un carico trasversale, le forze di laminazione tendono a piegare elasticamente i rulli. Naturalmente, maggiore è il modulo di Young del materiale del rullo, minore è la sua deformazione durante la lavorazione.

Come risultato della flessione dei rulli, il pezzo tende ad essere più spesso nella zona centrale rispetto alle estremità. Per ovviare a questo inconveniente si rettificano i rulli in modo tale che il loro spessore nella parte centrale sia leggermente maggiore di quello delle estremità. Di conseguenza, quando i rulli si inflettono, il pezzo esce dal laminatoio con uno spessore costante.





LAMINAZIONE: VIBRAZIONI E CHATTER

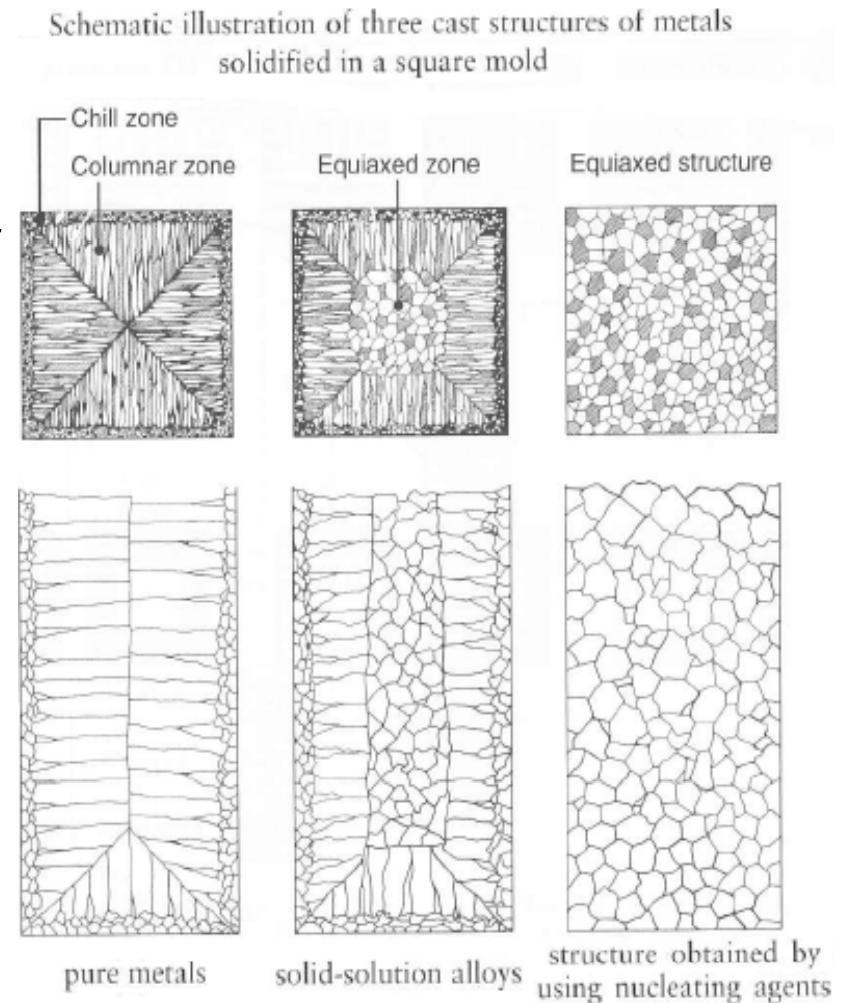
Le vibrazioni hanno un effetto significativo sulla qualità del prodotto e, in generale, limitano la produttività delle operazioni di laminazione.

Si definisce chatter una vibrazione autoeccitata, derivata dall'interazione dinamica tra i vari componenti in movimento, che porta a una variazione periodica dello spessore del pezzo con una conseguente scarsa finitura superficiale. Avviene più frequentemente nei processi di laminazione con rulli in serie e può limitare anche del 50% le velocità raggiungibili, con una notevole perdita economica.

I parametri di controllo sono la velocità di laminazione e la lubrificazione.

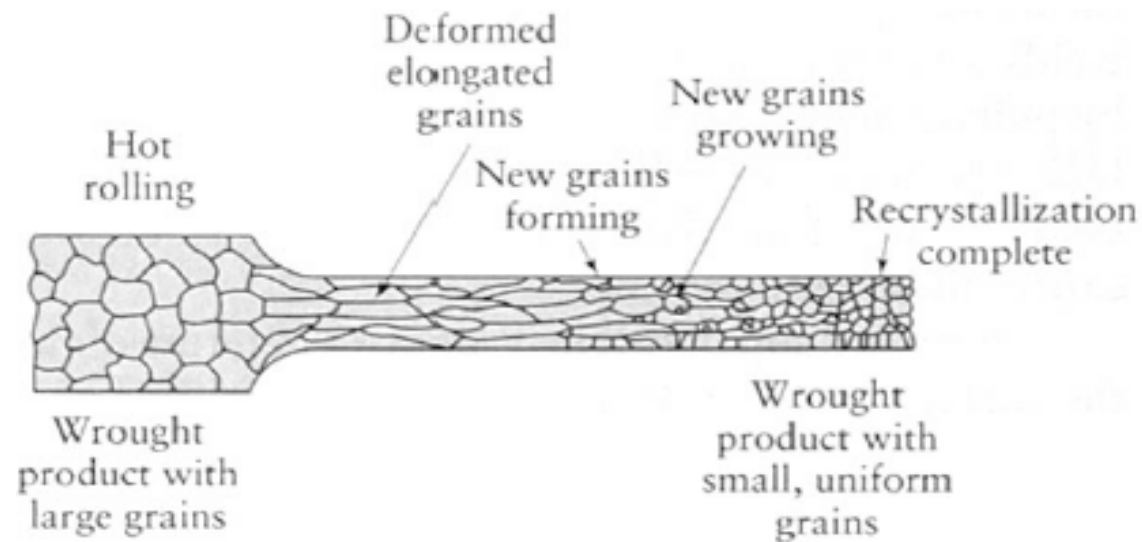
LAMINAZIONE: OPERAZIONI DI LAMINAZIONE

La fase iniziale del processo di laminazione è rappresentata dalla laminazione a caldo (*hot rolling*), che avviene a temperature superiori a quella di ricristallizzazione del materiale. In generale, la struttura interna del lingotto è dendritica, fragile e porosa e comprende grani non uniformi e di grandi dimensioni.



LAMINAZIONE: OPERAZIONI DI LAMINAZIONE

La laminazione a caldo trasforma questa struttura in una struttura con grani di dimensione minore con una migliore duttilità.





LAMINAZIONE: OPERAZIONI DI LAMINAZIONE

I prodotti della laminazione a caldo sono i seguenti:

- **bramme (blooms):**
 - hanno sezione quadrata;
 - da esse si producono profilati di varia sezione (per esempio a C, a L, a T o a I);
- **lastre (slabs):**
 - hanno sezione rettangolare;
 - da esse si producono lamiere o piastre a seguito di una ulteriore laminazione;
- **billette (billets):**
 - hanno sezione quadrata o circolare;
 - sono utilizzate per operazioni successive di trafilatura.



LAMINAZIONE: OPERAZIONI DI LAMINAZIONE

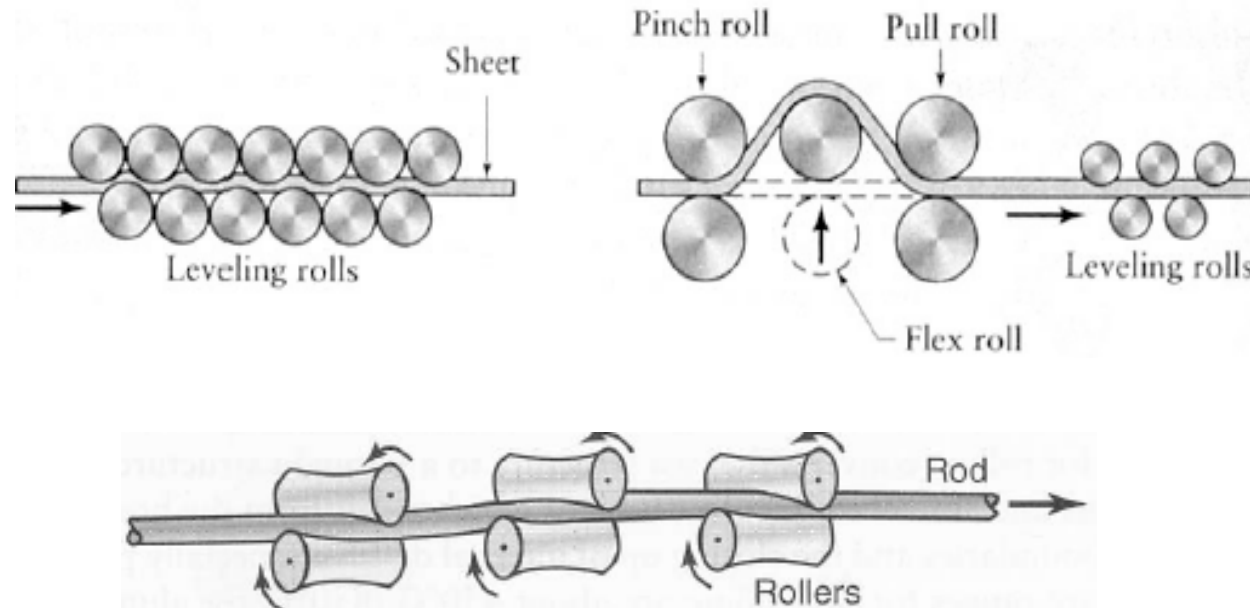
Prima della laminazione a caldo si rimuovono ossidi e le scaglie superficiali tramite un cannello (torcia) o una sgrossatura per abrasione. Dopo la laminazione a caldo gli ossidi vengono rimossi con acido tramite abrasione o getti d'acqua in pressione.

La laminazione a freddo (*cold rolling*) è realizzata a temperatura ambiente e produce fogli o lamiere con finitura superficiale, tolleranze dimensionali e proprietà meccaniche migliori rispetto alla laminazione a caldo.

E' possibile eseguire anche una laminazione a pacchetto (*pack rolling*), nella quale si lavorano insieme due o più strati per aumentare la produttività. Questo processo è utilizzato per produrre, per esempio, fogli di alluminio. La parte a contatto con i rulli assume una superficie splendente, mentre le superfici di interfaccia tra i fogli hanno un aspetto satinato.

LAMINAZIONE: OPERAZIONI DI LAMINAZIONE

Per aumentare la planarità delle lamiere si può utilizzare una serie di rulli livellanti: ognuno di essi è mosso da un motore indipendente e flette la lamiera nel verso opposto al precedente.





LAMINAZIONE: OPERAZIONI DI LAMINAZIONE

Per quanto riguarda la lubrificazione, si utilizzano i seguenti accorgimenti:

- per le leghe ferrose non si fa uso di lubrificazione, tranne alcuni casi in cui si utilizza la grafite;
- si utilizzano delle soluzioni acquose per raffreddare i rulli e per eliminare l'ossido che si forma sul pezzo in lavorazione;
- per le leghe non ferrose si utilizzano oli, emulsioni e acidi grassi;
- nella laminazione a freddo si utilizzano lubrificanti a bassa viscosità, come oli minerali, emulsioni, paraffine e oli grassi.



LAMINAZIONE: DIFETTI DI LAMINAZIONE

La laminazione può indurre nel laminato difetti superficiali e difetti strutturali interni. Essi, oltre a degradare l'aspetto della superficie, influiscono in senso negativo sulla resistenza, sulla tenacità e sulle altre caratteristiche meccaniche del pezzo.

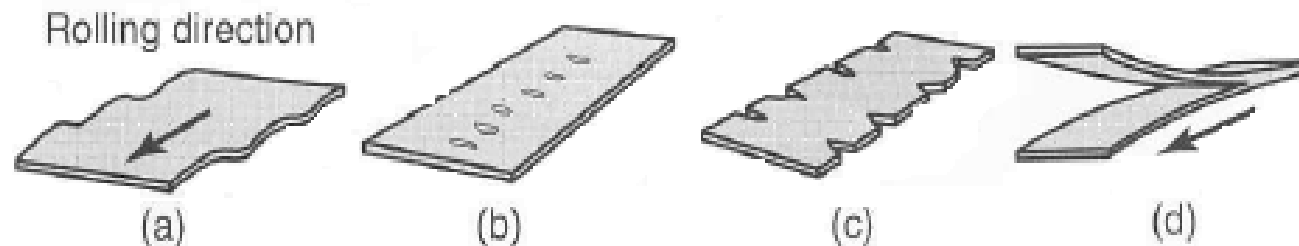
I difetti superficiali possono derivare da inclusioni e impurità nel materiale del lingotto (come scaglie d'ossido), dalle operazioni di preparazione per la laminazione, oppure dal processo di laminazione stesso.

I difetti strutturali, invece, modificano o compromettono il comportamento di un laminato.

LAMINAZIONE: DIFETTI DI LAMINAZIONE

In genere, si possono osservare i seguenti difetti:

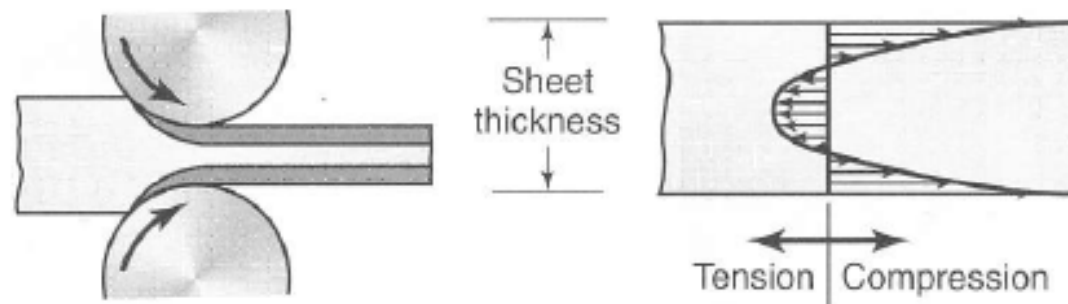
- ondulazioni al bordo (figura a);
- cricche a cerniera al centro (figura b);
- cricche al bordo (figura c);
- de laminazione (figura d).



LAMINAZIONE: SFORZI RESIDUI DI LAMINAZIONE

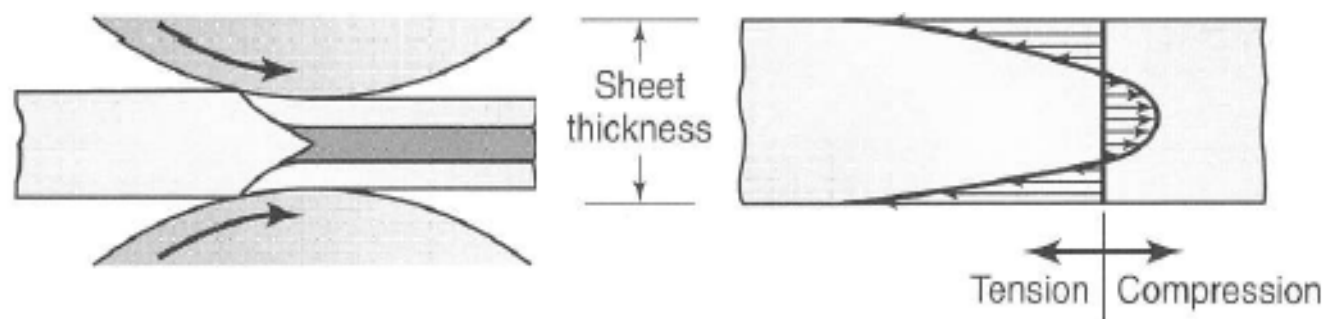
A causa della deformazione non uniforme del materiale all'interno dello spazio delimitato dai rulli, possono insorgere degli sforzi residui nel laminato, soprattutto durante la laminazione a freddo.

I rulli di piccolo diametro tendono a deformare maggiormente la superficie e a generare sforzi di compressione all'esterno e sforzi di trazione all'interno.



LAMINAZIONE: SFORZI RESIDUI DI LAMINAZIONE

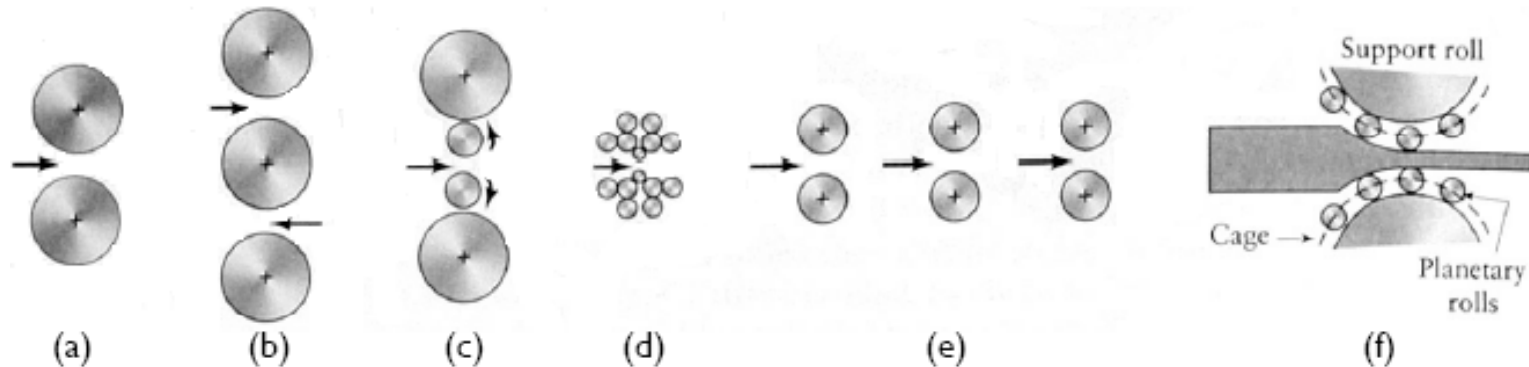
Con i rulli di diametro maggiore, invece, l'attrito limita la deformazione della superficie e si generano sforzi di trazione all'esterno e sforzi di compressione all'interno.



LAMINAZIONE: TIPOLOGIE DI LAMINATOIO

Esistono numerose tipologie di laminatoio. I principali sistemi di laminazione sono indicati nella seguente figura:

- **sistema a due rulli sovrapposti** (figura a): si usa per laminazioni iniziali;
- **sistema a tre rulli sovrapposti** (figura b): si usa per laminazioni iniziali;
- **sistema a quattro rulli sovrapposti** (figura c): i rulli a diametro maggiore riducono la flessione dei rulli più piccoli;
- **sistema in cluster** (figura d);
- **laminazione in tandem con tre stadi** (figura e);
- **sistema di laminazione planetario** (figura f).



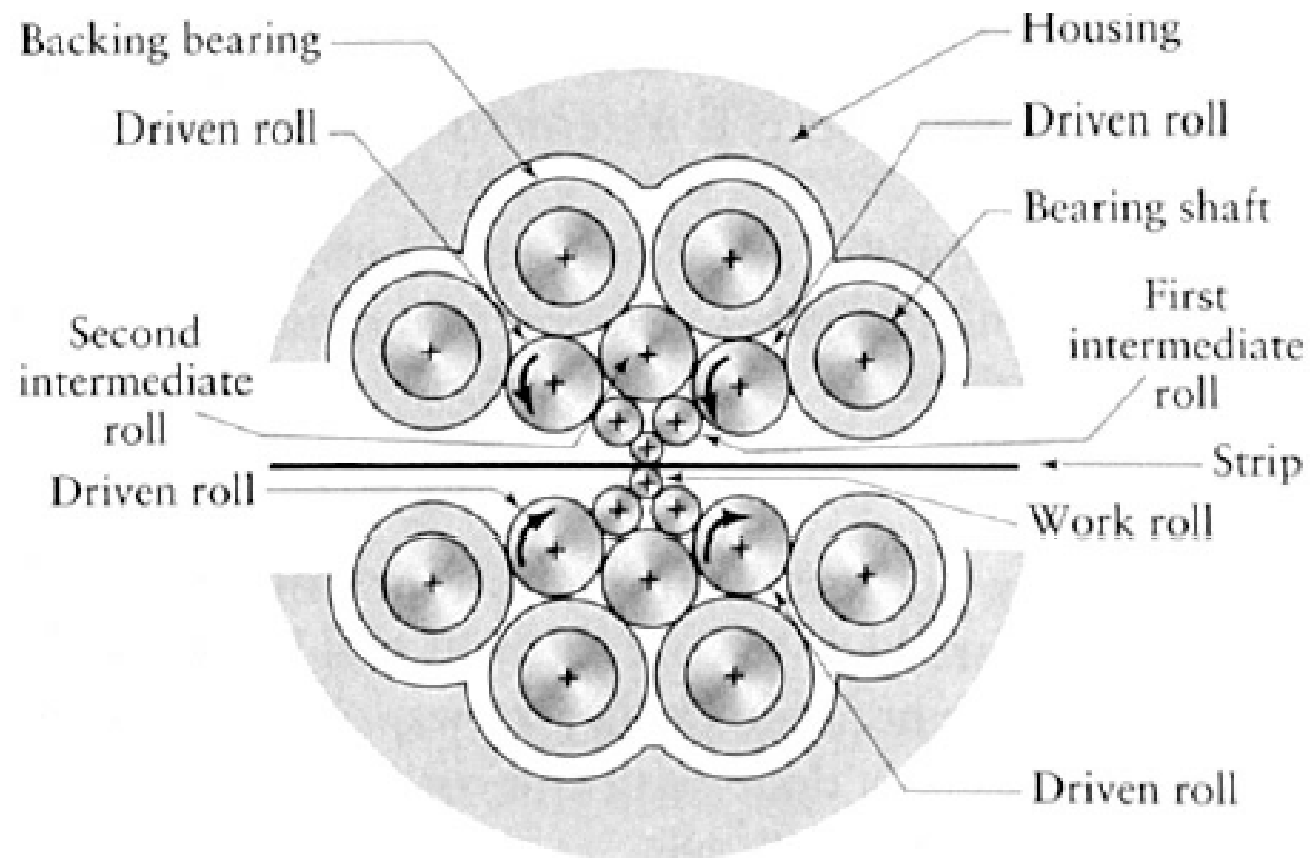


LAMINAZIONE: TIPOLOGIE DI LAMINATOIO

Un particolare tipo di laminatoio è rappresentato dal sistema in cluster che ha le seguenti caratteristiche:

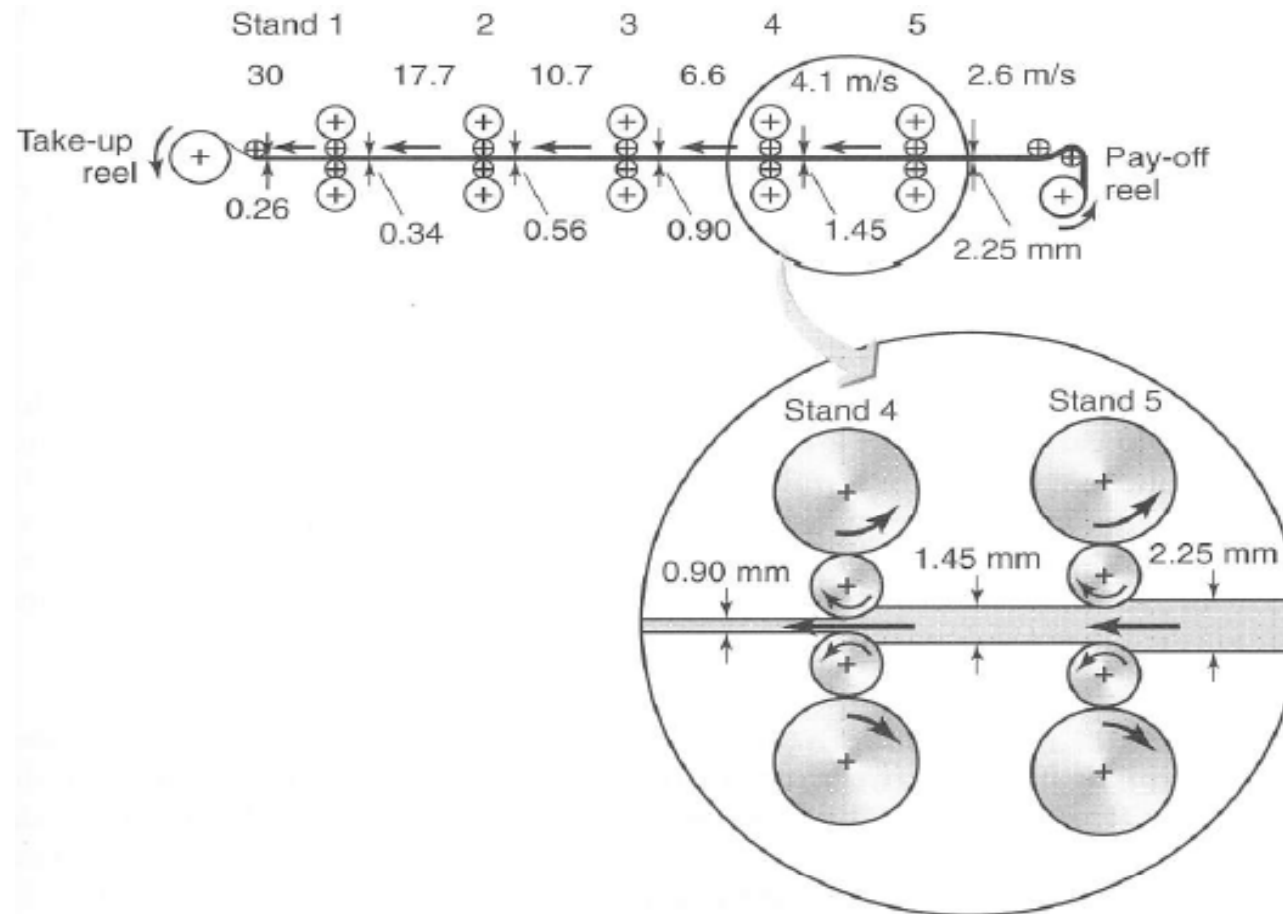
- si utilizza per laminazioni a freddo in fogli sottili (fino a 2.5 μm) di materiali duri e fogli molto larghi (5 m);
- ottimo controllo dimensionale dovuto all'elevata rigidità del sistema;
- elevata automatizzazione (il sistema può raggiungere una velocità di lavorazione di 25 m/s);
- i rulli, in genere, sono realizzati in ghisa o in acciaio forgiato;
- il rullo di lavoro centrale è realizzato solitamente carburo di tungsteno.

LAMINAZIONE: TIPOLOGIE DI LAMINATOIO



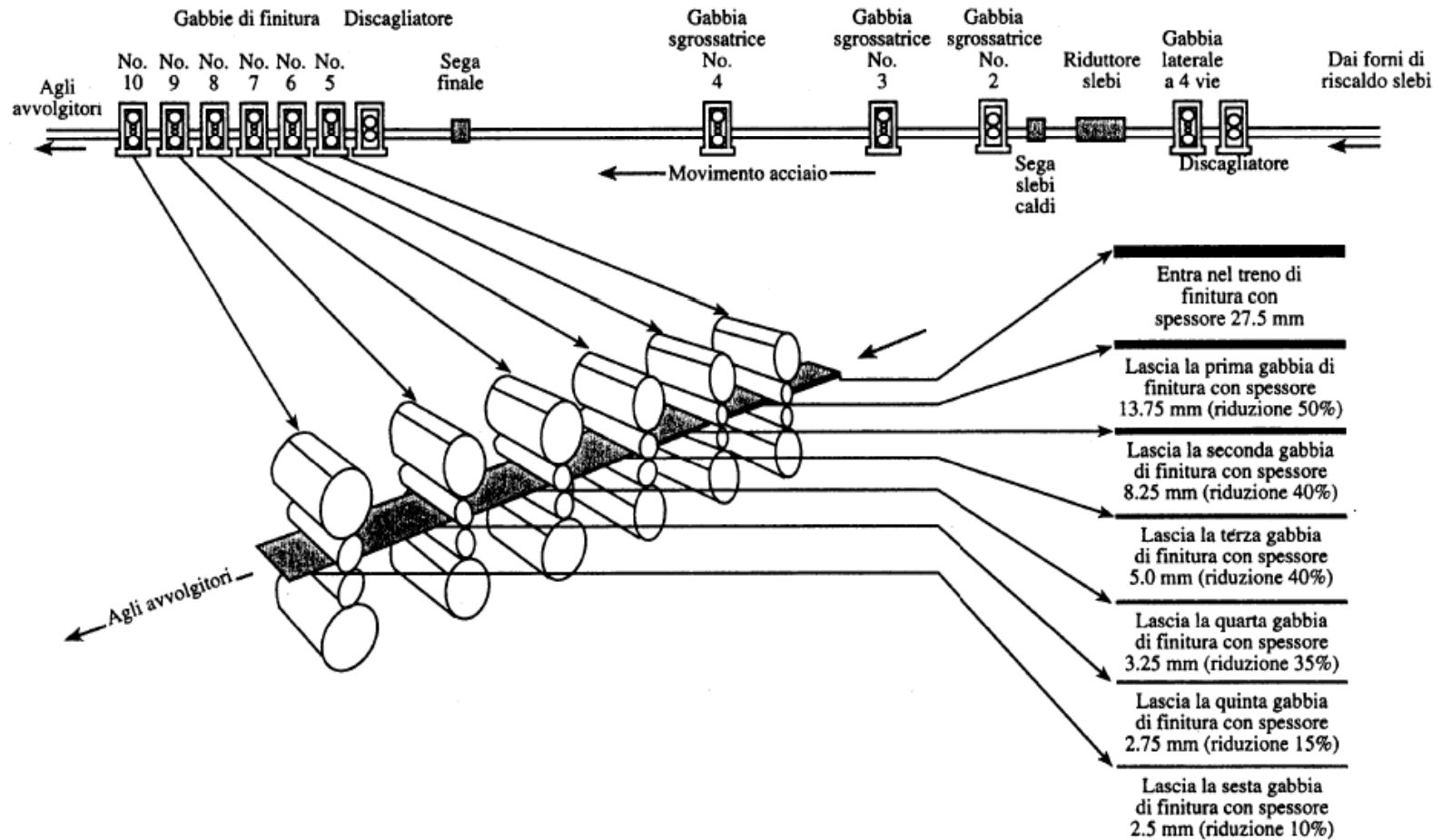
LAMINAZIONE: TIPOLOGIE DI LAMINATOIO

La seguente figura mostra uno schema di laminazione in tandem a più stadi:

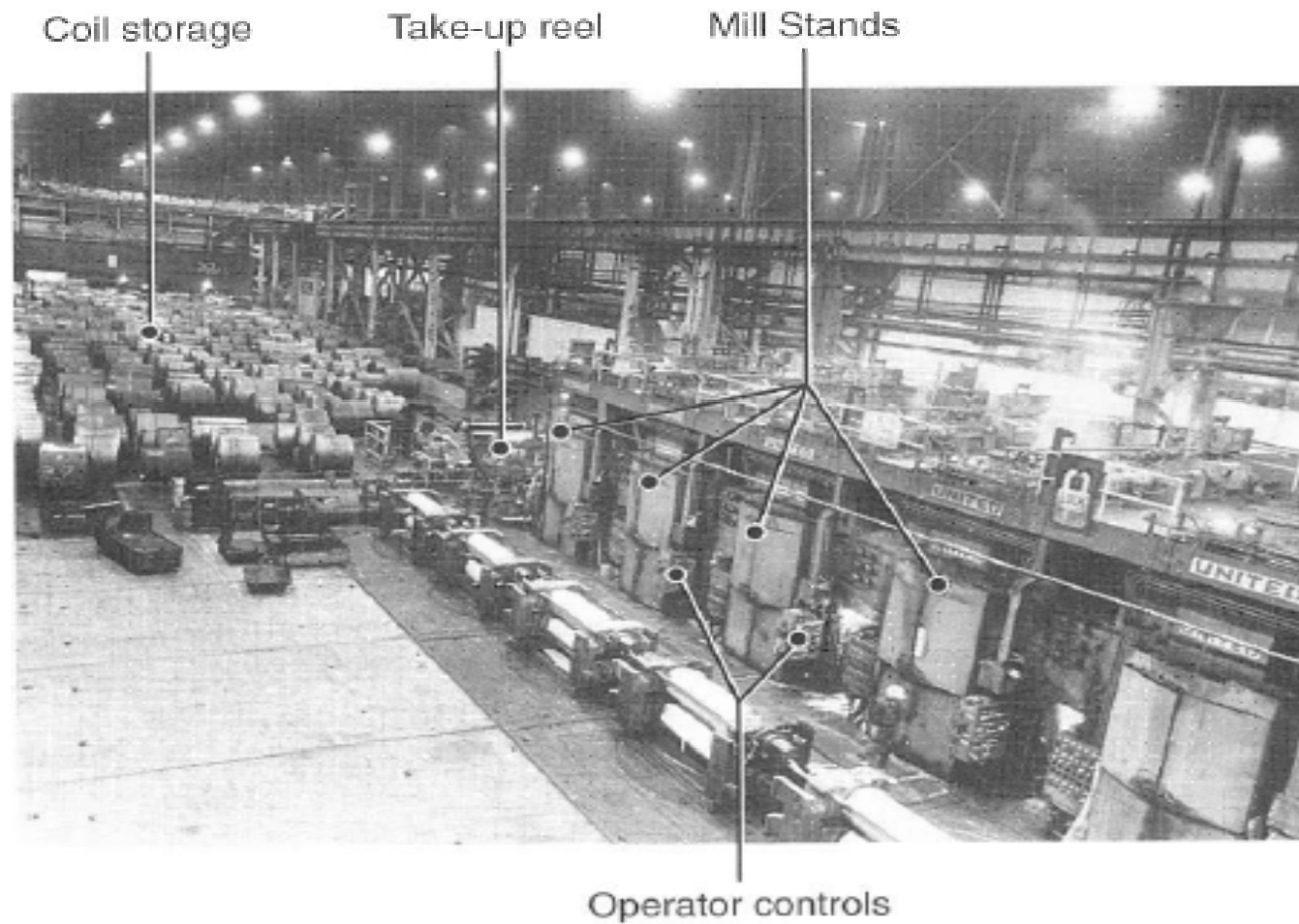


LAMINAZIONE: TIPOLOGIE DI LAMINATOIO

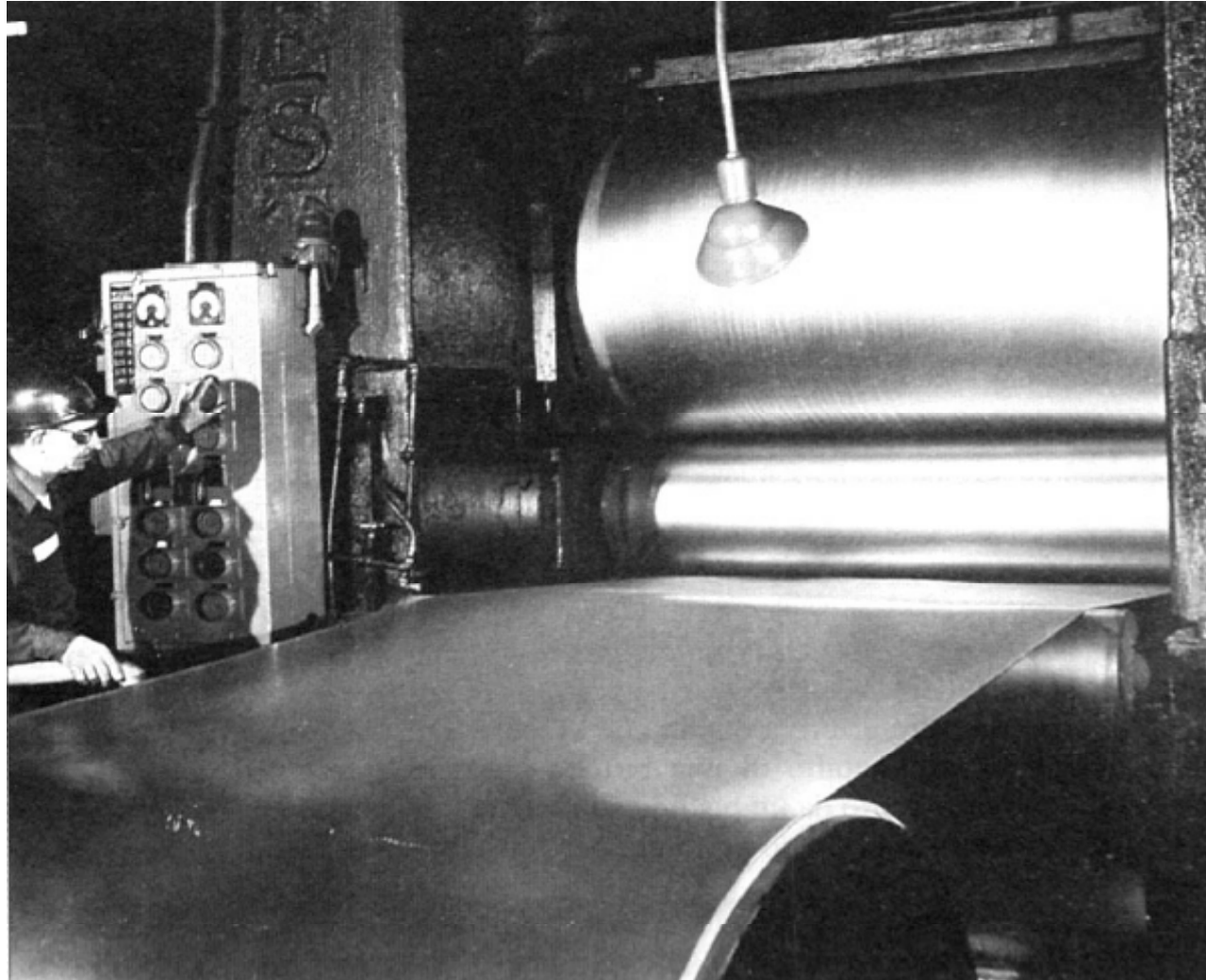
Le figure che seguono mostrano alcuni esempi di stazioni di laminazione (si notino le dimensioni degli impianti):



LAMINAZIONE: TIPOLOGIE DI LAMINATOIO



LAMINAZIONE: TIPOLOGIE DI LAMINATOIO



Materiale curato da:
Ing. Carlo Andreotti

Tecnologie delle Costruzioni
Aerospaziali



LAMINAZIONE: TIPOLOGIE DI LAMINATOIO

Altri sistemi di laminazione sono rappresentati da:

- **Minilaminatoi:** utilizzano metalli da riciclo che vengono fusi in forni ad arco elettrico, colati in continuo e laminati direttamente in specifiche linee di produzione. In genere operano a livello locale, sia per il recupero di materiale da riciclo, sia per la vendita dei prodotti.
- **Laminatoi integrati:** sono sistemi di grandi dimensioni che integrano attività complete dalla produzione in colata alla laminazione nei prodotti finali con ampia flessibilità.



LAMINAZIONE: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE

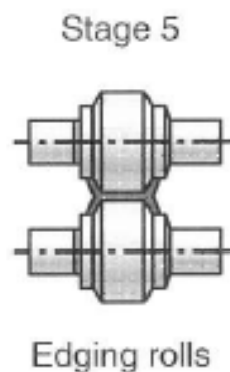
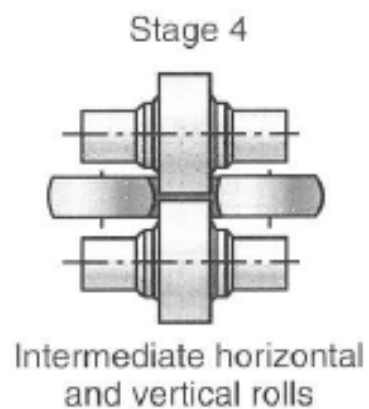
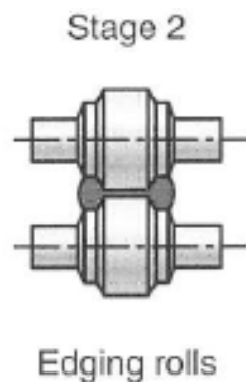
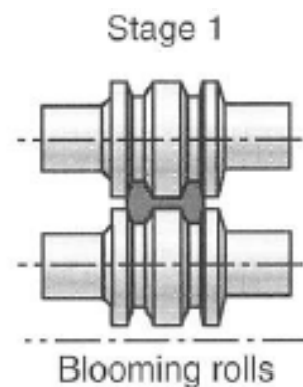
Nel corso del tempo sono stati sviluppati diversi processi di laminazione e numerose tipologie di laminatoio con lo scopo di produrre specifiche famiglie di prodotti.

1. Shape rolling.

E' un processo che utilizza le bramme per produrre laminati di sezione particolare tramite laminazioni a più stadi.

In genere si lavora ad elevate temperature (*hot shape rolling*), ma si può lavorare anche a freddo (*cold shape rolling*) se di parte da semilavorati in forma di filo.

LAMINAZIONE: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE



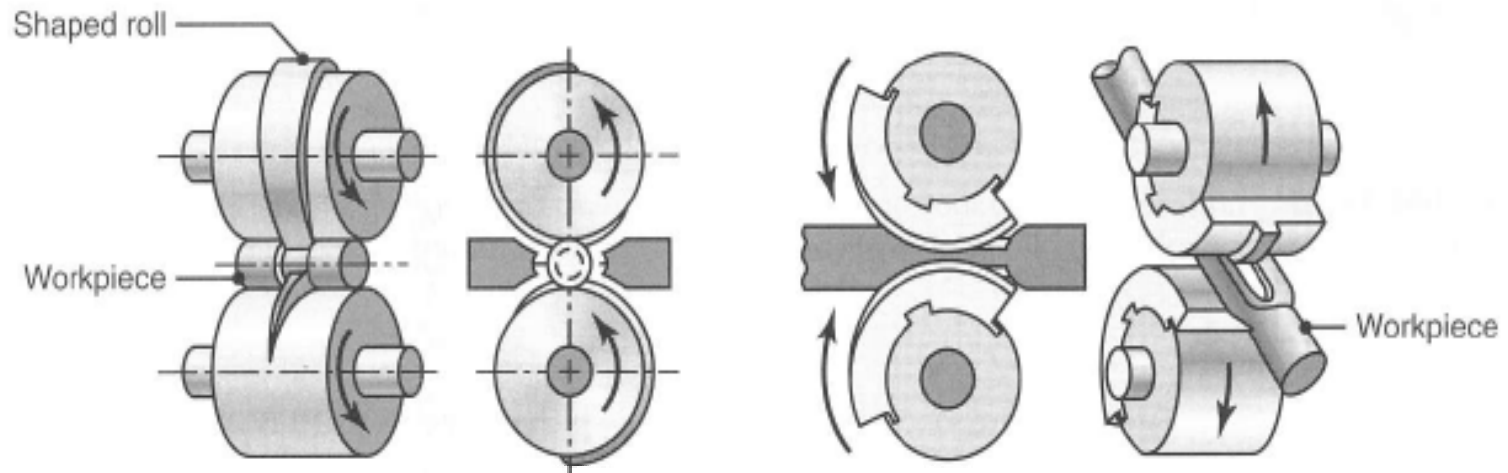
LAMINAZIONE:

DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE

2. Forgiatura a rullo (roll forging).

E' un processo in cui la sezione di una barra circolare attraversa una coppia di rulli con superficie scanalata.

Si producono alberi conici, balestre, coltelli da tavola e utensili.

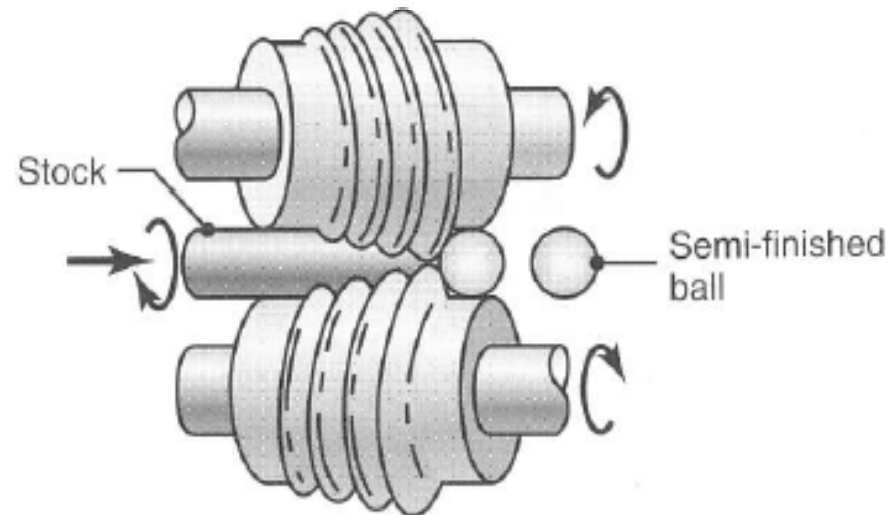


LAMINAZIONE:

DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE

3. Laminazione a cilindri obliqui (skew rolling).

E' un processo simile alla forgiatura a rullo. A partire da una barra circolare si producono sfere in modo continuo tramite una particolare forma dei rulli rotanti.





LAMINAZIONE: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE

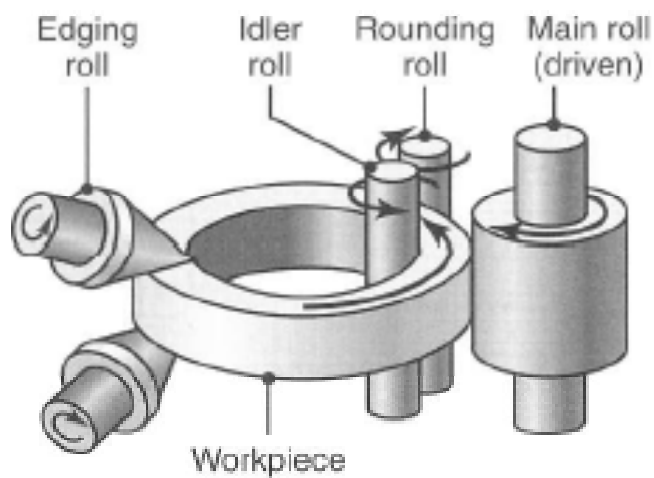
4. Laminazione ad anello (ring rolling).

E' un processo in cui un anello di spessore elevato, posto tra due gruppi di rulli, è espanso in un anello di diametro maggiore e sezione inferiore.

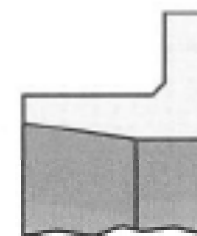
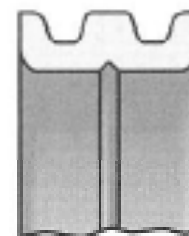
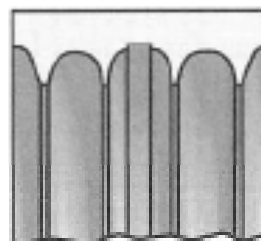
La riduzione di spessore è effettuata tramite l'avvicinamento dei rulli durante la rotazione.

Si producono grandi anelli di tenuta per turbine o per cuscinetti con tolleranze molto basse e disposizione dei grani favorevole alle proprietà meccaniche.

LAMINAZIONE: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE



Examples of cross-sections that
can be formed by ring rolling

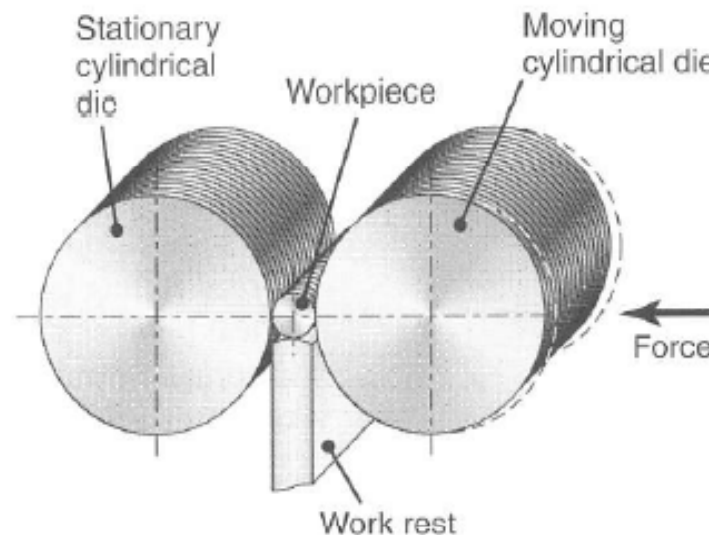


LAMINAZIONE:

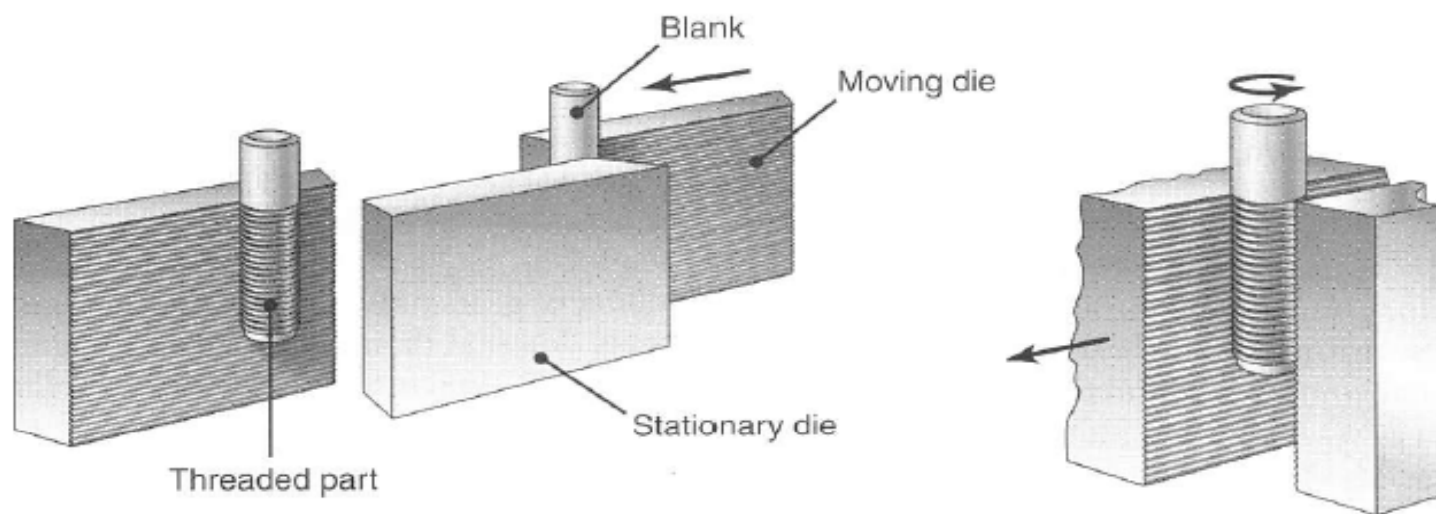
DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE

5. Laminazione con rulli filettatori (thread rolling).

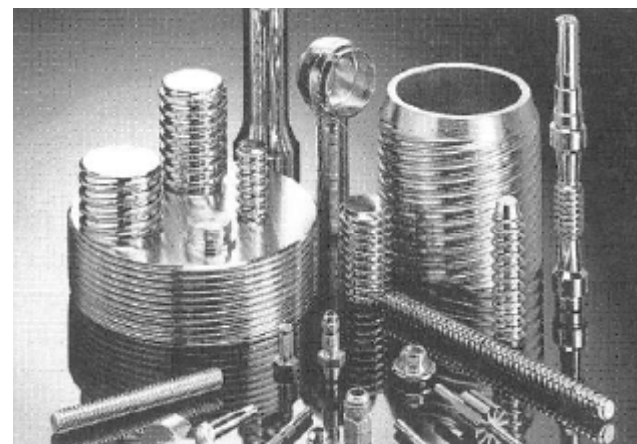
E' un processo di formatura a freddo in cui sono generati filetti dritti o conici su barre circolari durante il passaggio attraverso i rulli filettatori di forme diverse. Le seguenti figure mostrano alcune tipologie di rulli filettatori:



LAMINAZIONE: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE



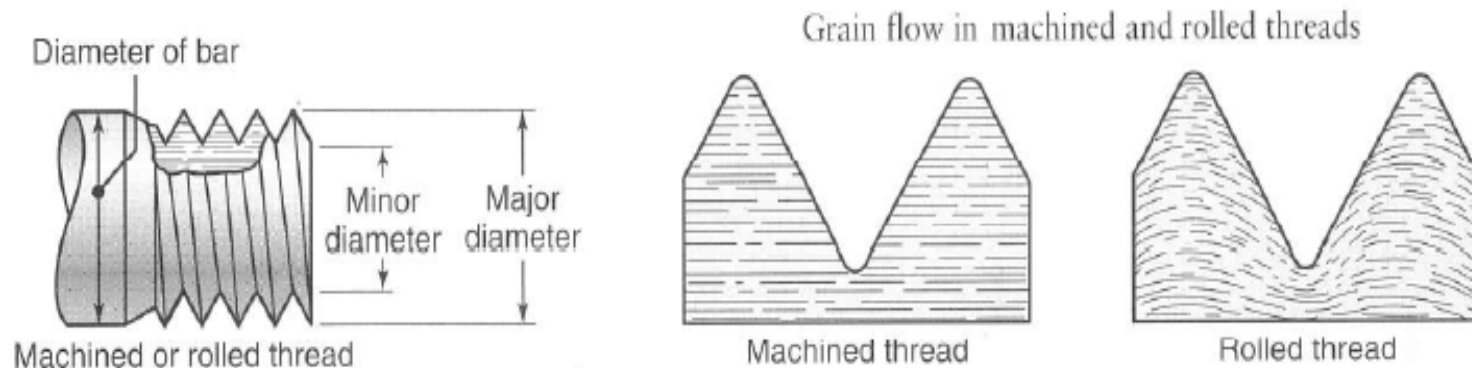
Si producono tipicamente viti,
bulloni, ingranaggi a elica e
oggetti filettati.



LAMINAZIONE: DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE

La filettatura avviene senza asportazione di truciolo.

Questa tipologia di realizzazione dei filetti è migliore di quella realizzata per asportazione di truciolo, perché non taglia la linee di flusso dei grani, ma le distorce aumentando la resistenza del filetto.



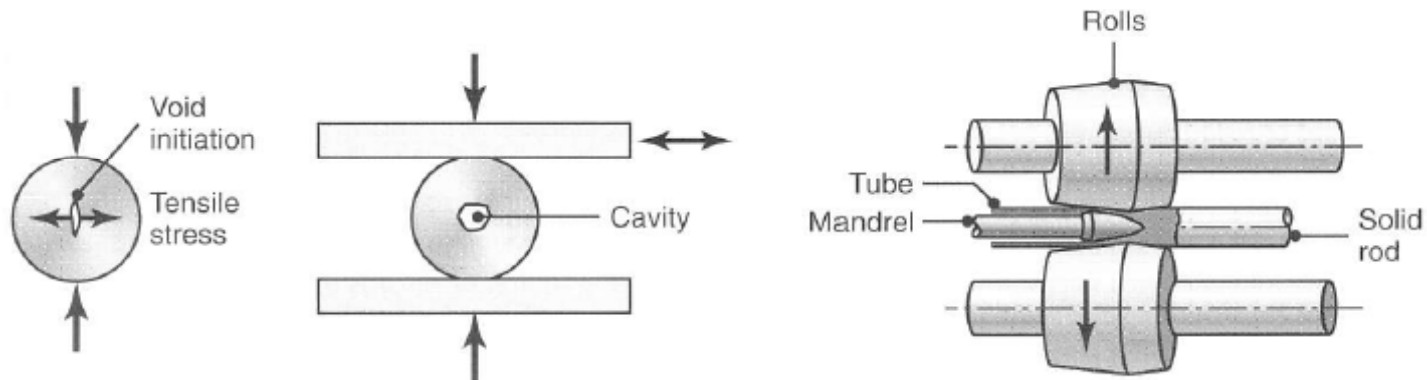
LAMINAZIONE:

DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE

6. Rotary tube piercing.

E' un processo che permette di realizzare tubi cavi con particolari profili interni.

Sfrutta il Principio di Mannesmann, che afferma che un cilindro compresso si frattura al centro per sforzi secondari. Di conseguenza, se il tubo è compresso durante la rotazione, si può sviluppare una cavità al centro. Utilizzando un mandrino sagomato, si può allargare la cavità e realizzare il profilo interno desiderato.



LAMINAZIONE:

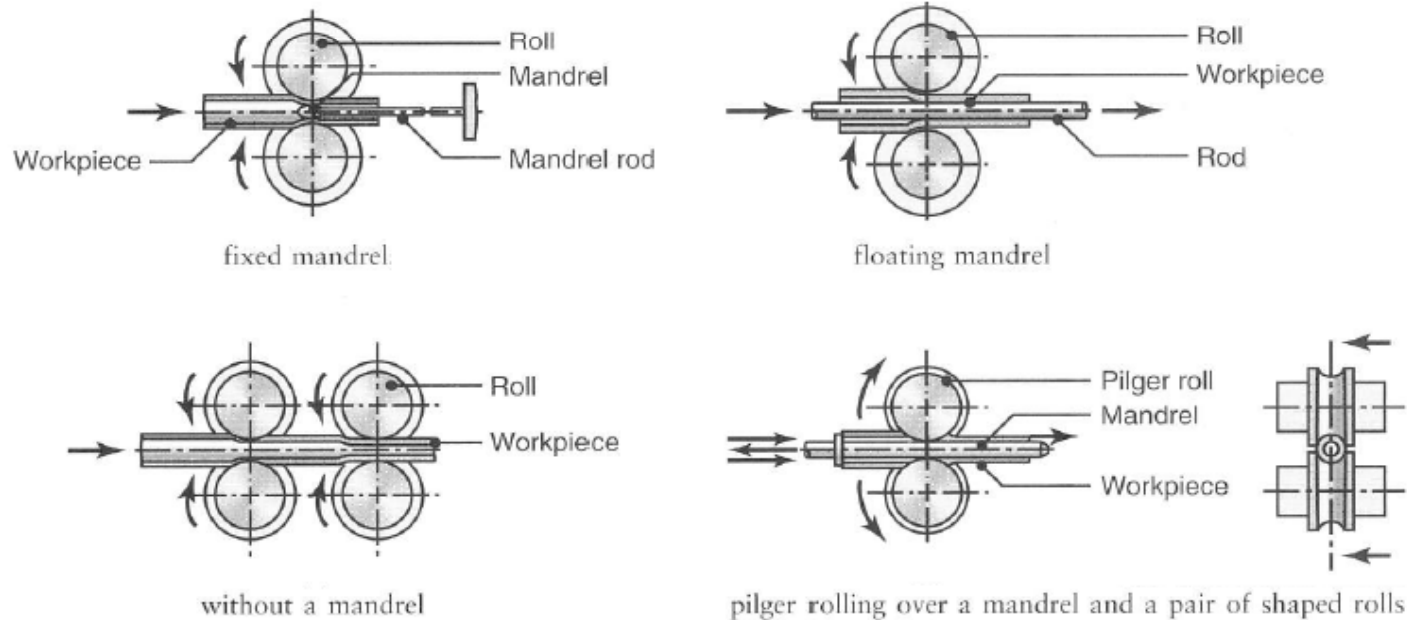
DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE

7. Laminazione a tubo (tube rolling).

E' un processo che permette di ridurre lo spessore e il diametro dei tubi attraverso il passaggio tra rulli sagomati.

Il mandrino interno può essere presente o assente.

Schematic illustration of various tube-rolling processes

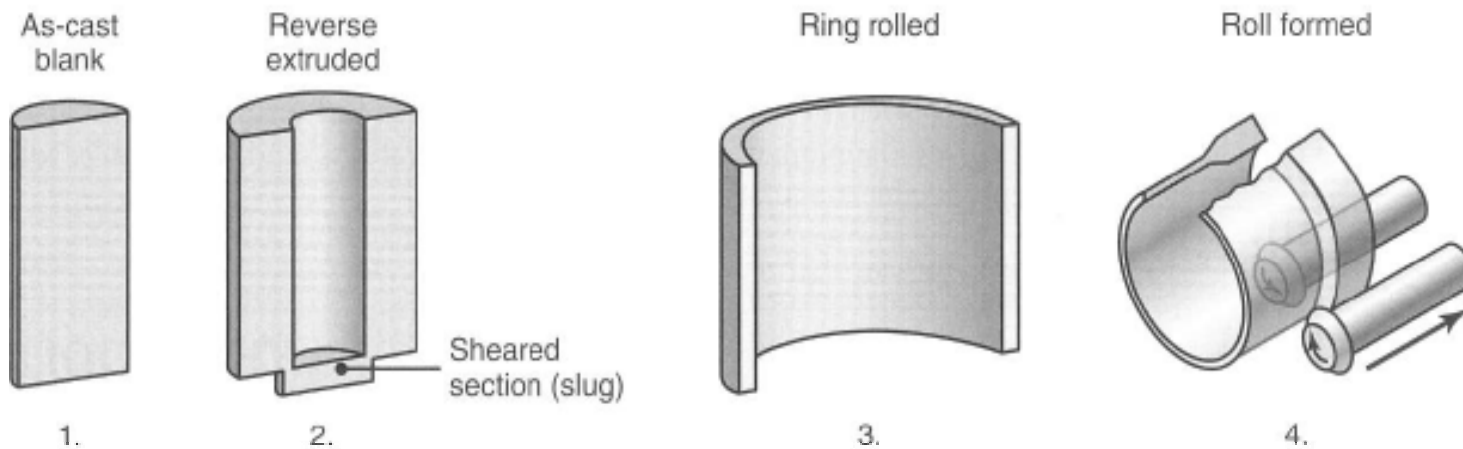


LAMINAZIONE:

DIFFERENTI TIPOLOGIE DI LAMINAZIONE

Esempio di formatura degli involucri degli endoreattori a propellente solido dello Space Shuttle:

The forming processes involved in the manufacture of solid rocket casings for the space shuttles.

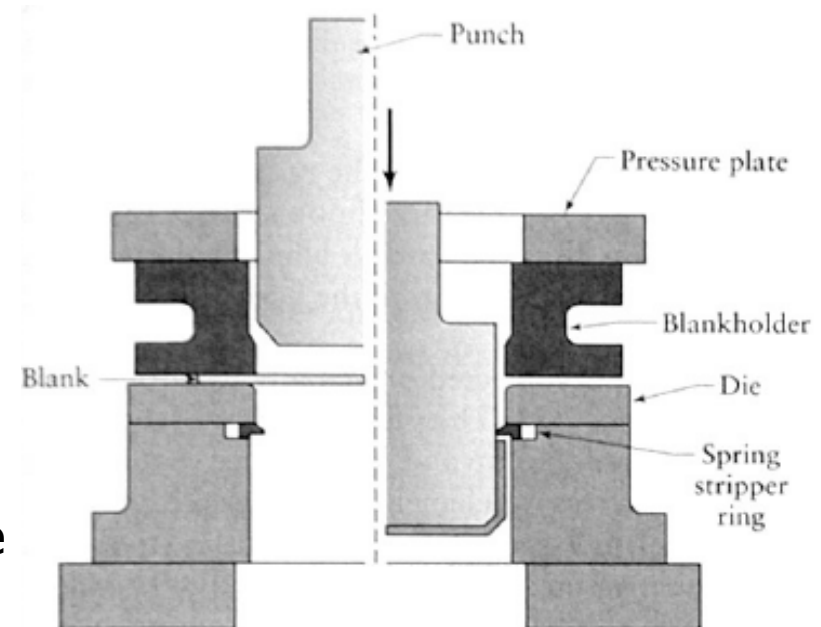


IMBUTITURA

L'imbutitura è un processo di formatura delle lamiere durante il quale esse subiscono una profonda deformazione per essere trasformate in prodotti concavi.

E' utilizzata per formare lattine, lavandini, pentole, container, serbatoi di carburante e molti altri oggetti.

In un tipico processo di imbutitura una lamiera è posta su uno stampo circolare ed è tenuta ferma da un anello di fissaggio (*blank holder*). Un punzone si muove perpendicolarmente alla lamiera e la forza ad entrare nella cavità dello stampo.



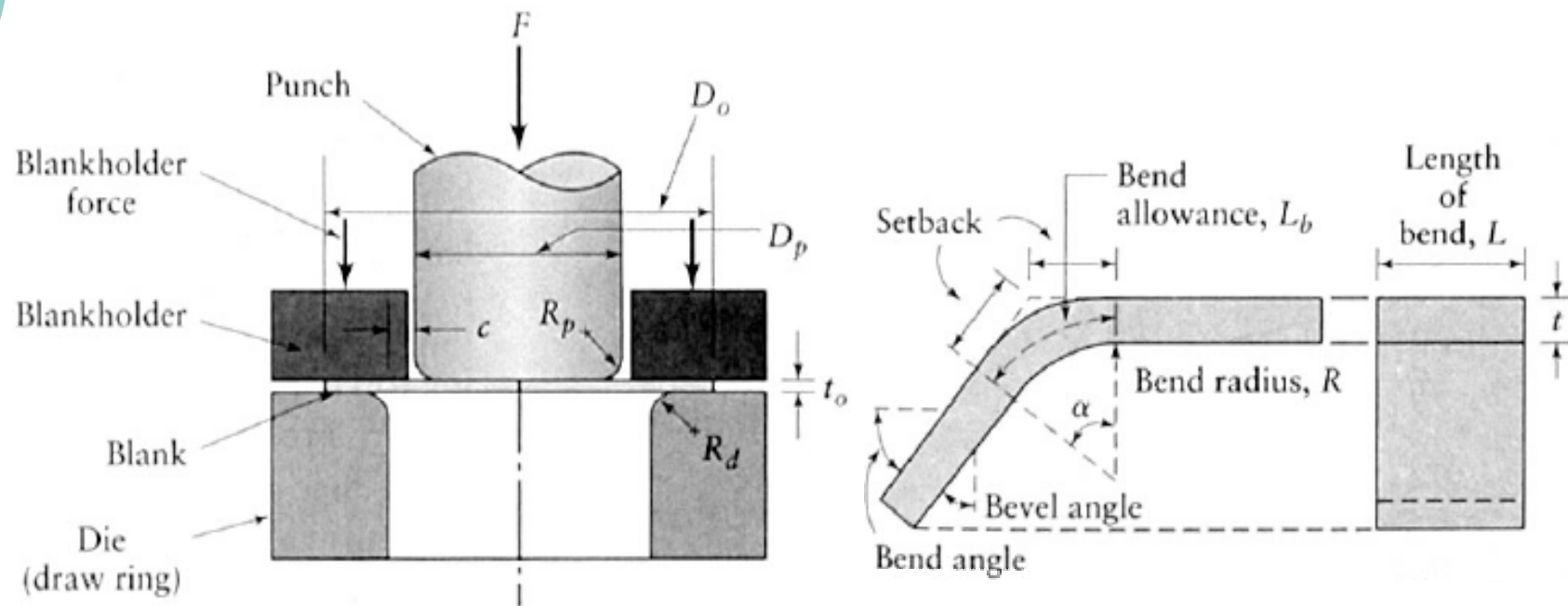


IMBUTITURA

Le variabili più significative che riguardano il processo di imbutitura sono le seguenti:

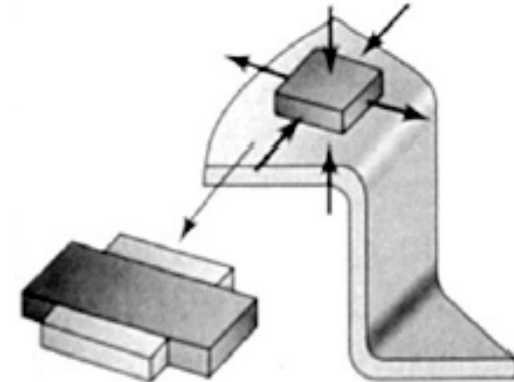
- proprietà della lamiera;
- rapporto tra il diametro del pezzo di lamiera da formare e del punzone;
- spessore della lamiera;
- gioco tra punzone e stampo;
- raggio di curvatura degli spigoli dello stampo e del punzone;
- forza sui blocchi di fissaggio;
- attrito e lubrificazione del punzone, dello stampo e dell'interfaccia con il pezzo;
- velocità del punzone;
- lunghezza dell'asse neutro nella zona piegata (*bend allowance*);
- Angolo di smusso (*bevel angle*).

IMBUTITURA

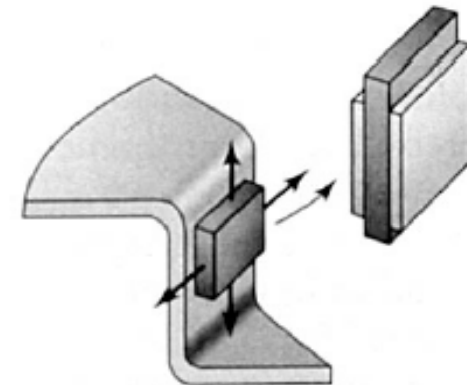


IMBUTITURA: SFORZI AGENTI DURANTE IL PROCESSO DI IMBUTITURA

Durante la lavorazione la pressione del blocco di fissaggio deve essere tale da evitare l'insorgere di sforzi radiali, che provocano compressioni tangenziali.



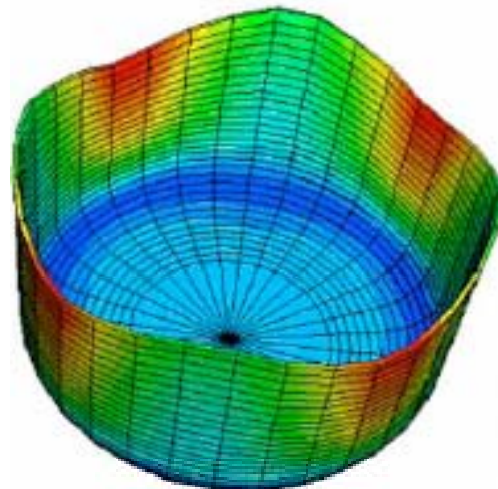
L'azione del punzone genera sforzi di trazione che impediscono la contrazione tangenziale della lamiera.



IMBUTITURA: EARING

E' un problema legato all'anisotropia planare delle lamiere: a seguito della lavorazione si formano delle "orecchie" sui bordi liberi del pezzo, il cui numero dipende dalla storia del processo e dalla microstruttura della lamiera.

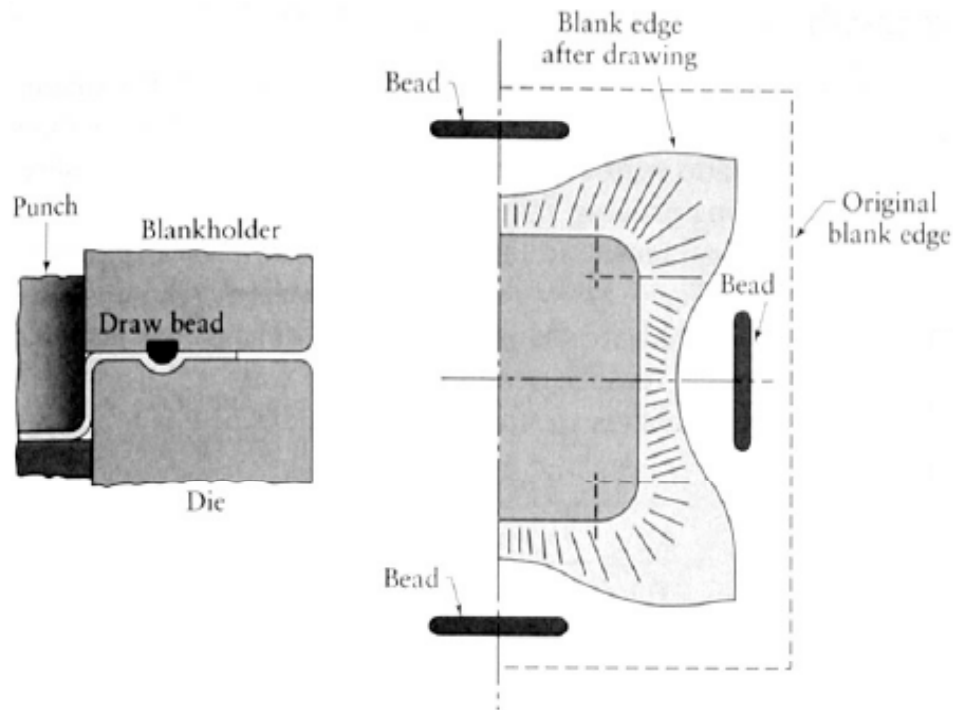
La rimozione delle "orecchie" genera una notevole quantità di materiale di scarto.



IMBUTITURA: DRAW BEADS (ROMPIGRINZE)

Permettono di controllare il flusso di materiale all'interno della cavità delineata dagli stampi, inducendo un aumento della forza necessaria a deformare la lamiera.

Sono spesso utili per l'imbutitura di parti non simmetriche.

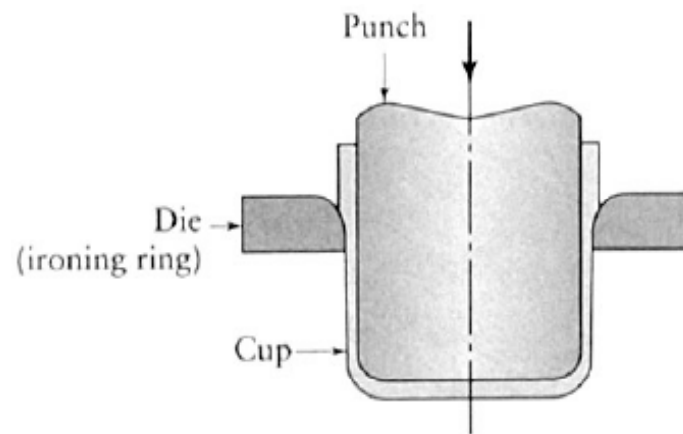


IMBUTITURA: IRONING

E' un particolare fenomeno di stiramento del che si verifica quando il gioco tra lo stampo e il punzone è inferiore allo spessore della lamiera. Il prodotto finale ha la caratteristica di avere la parete laterale più sottile della base.

Per controllare lo spessore della parete si possono utilizzare più anelli (*ironing rings*).

Con questo metodo si possono ottenere imbutiture più profonde.



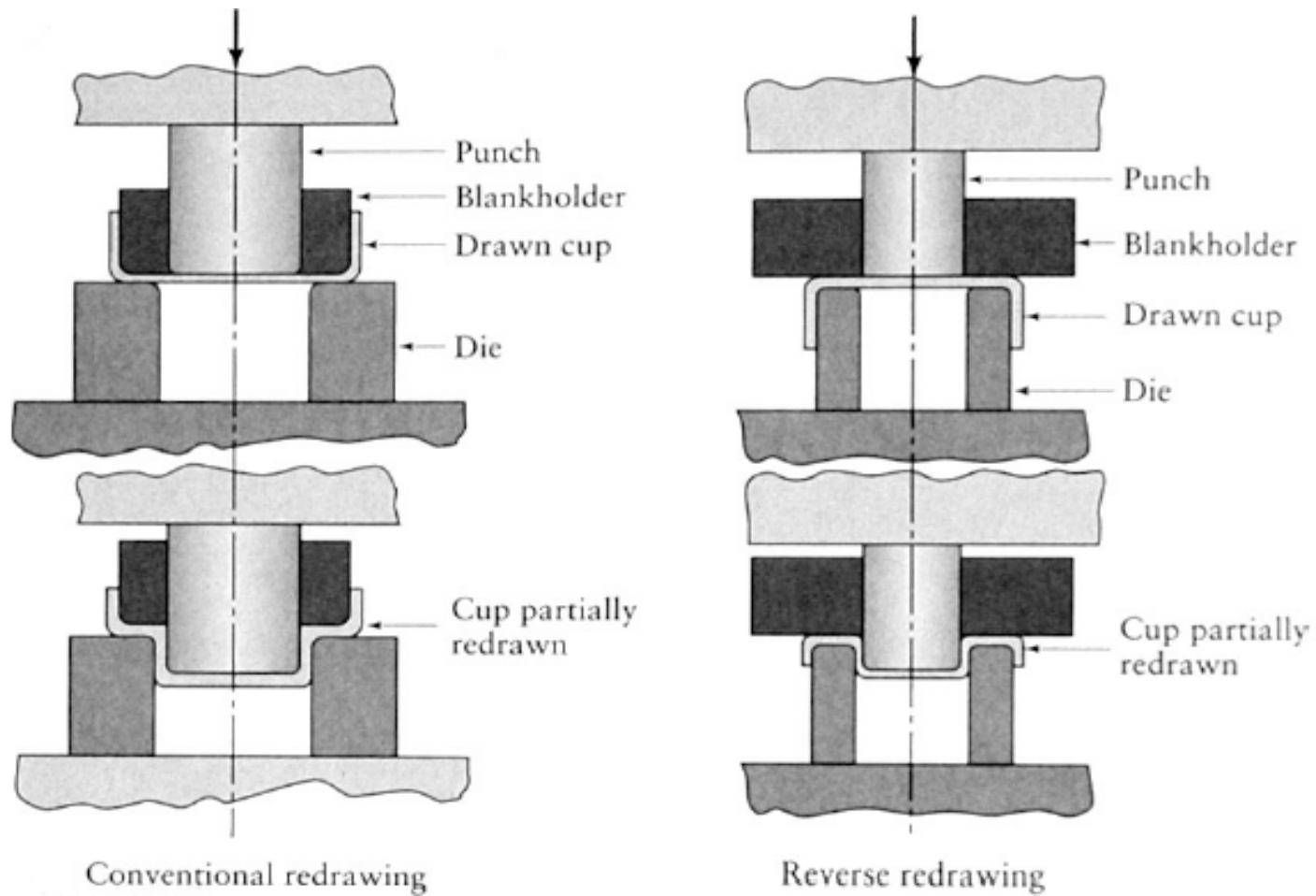


IMBUTITURA: REDRAWING

E' un particolare tipo di imbutitura che sfrutta il principio del rammollimento per deformazione opposta, anche noto come effetto Bauschinger. A causa dell'invarianza del volume del materiale, si può ottenere un'imbutitura più profonda se il pezzo subisce successive imbutiture con spessori via via inferiori.

La posizione del pezzo può essere anche invertita durante il processo di lavorazione (*reverse redrawind*) per ottenere un particolare forma finale.

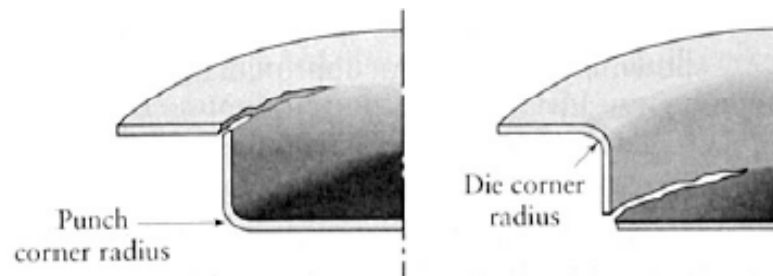
IMBUTITURA: REDRAWING



IMBUTITURA: OPERAZIONI NELL'IMBUTITURA

Il gioco tra il punzone e lo stampo deve essere tra il 7% e il 14% maggiore dello spessore originale della lamiera.

I raggi di curvatura del punzone e dello stampo non devono essere troppo ridotti per evitare rotture, ma neanche troppo elevati per evitare corrugamenti.



La geometria dei draw beads deve essere studiata in modo accurato per ottimizzare la deformazione della lamiera durante l'imbutitura.

La pressione sui blocchi di trattenimento deve essere compresa tra 0.7% e 1% della somma tra lo sforzo di snervamento e lo sforzo di rottura della lamiera.



IMBUTITURA: OPERAZIONI NELL'IMBUTITURA

Per quanto riguarda i materiali per gli utensili e per gli stampi si utilizzano acciai per utensili e ghise da colata.

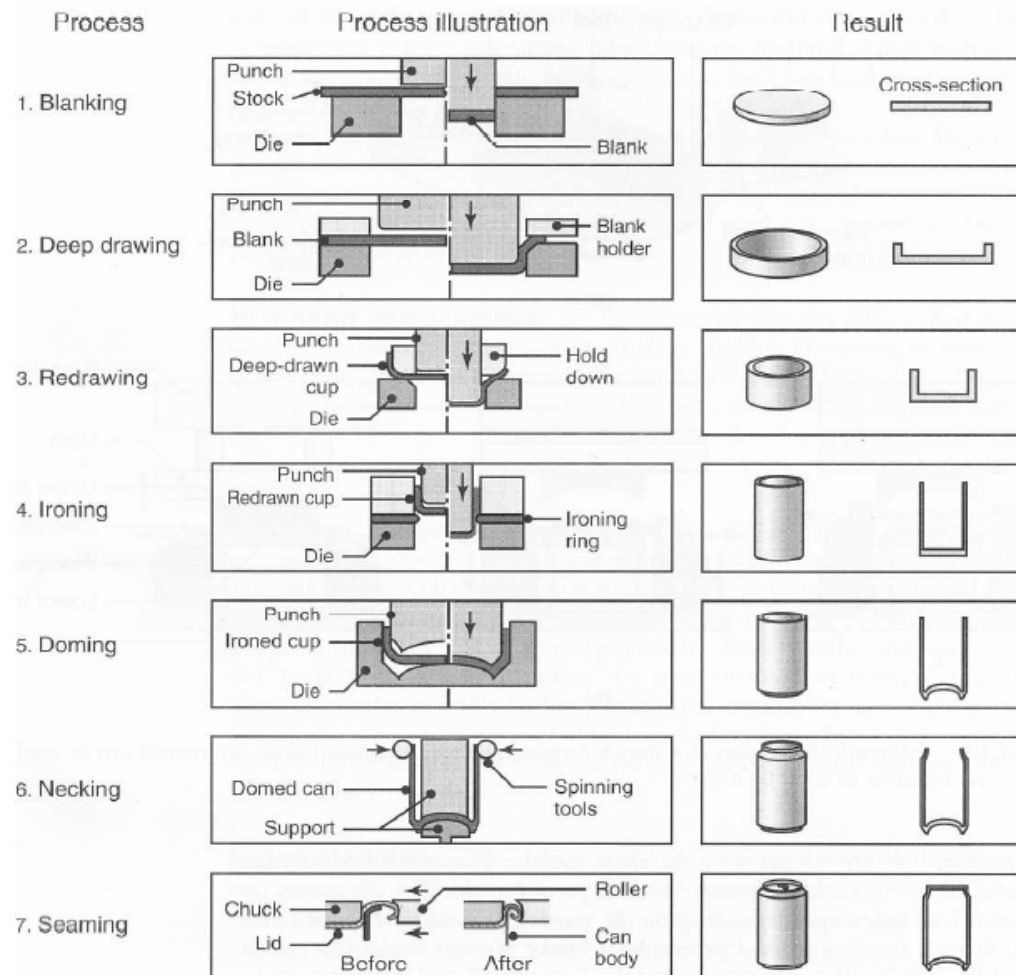
I macchinari più utilizzati sono le presse idrauliche e le presse meccaniche a doppia azione. Con queste macchine si possono controllare i blocchi di trattenimento e il punzone in modo indipendente. Si utilizzano velocità di movimento costanti e ridotte.

La lubrificazione nell'imbutitura è un aspetto molto importante per mantenere basse le forze agenti e ridurre l'attrito e i difetti. La lubrificazione del punzone è ridotta al minimo, poiché l'attrito con la lamiera è necessario per ottenere la forma desiderata. Si utilizzano oli, saponi, emulsioni, cere e rivestimenti solidi.

IMBUTITURA:

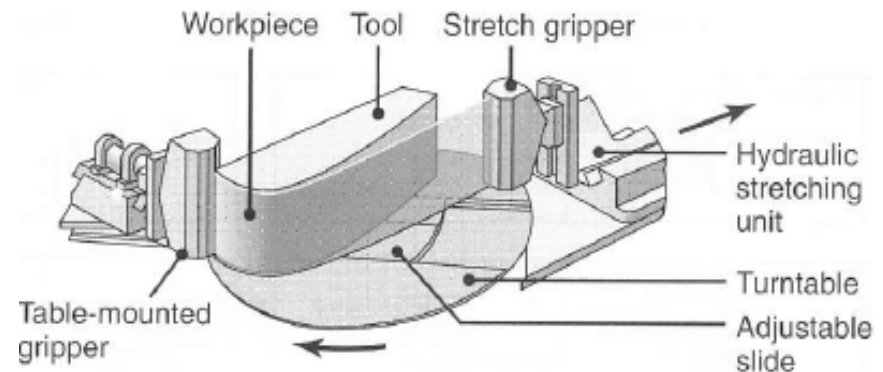
OPERAZIONI NELL'IMBUTITURA

Processo di fabbricazione di una lattina:



IMBUTITURA: FORMATURA PER STIRAMENTO

E' un particolare processo in cui una lamiera è bloccata agli estremi e stirata sopra uno stampo.



Lo stampo può muoversi in alto, in basso o nel piano, a seconda della forma finale desiderata.

Si producono tipicamente pannelli alari, pannelli di fusoliera e scafi delle navi.

