

Processi di giunzione I

Introduzione

Saldatura ad arco con elettro consumabile

Saldatura ad arco con elettrodo non consumabile

Saldatura con fasci ad alta energia

Il giunto saldato per fusione

Saldatura fredda

Saldatura ad ultrasuoni

Saldatura ad attrito

Saldatura per resistenza elettrica

Saldatura per esplosione

Diffusion bonding

Introduzione

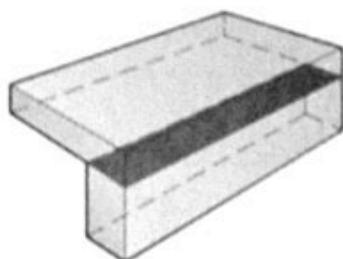
- In molti casi vi è la necessità di ricorrere alla giunzione tra più pezzi. Le ragioni possono essere:
 - Non è possibile o antieconomico produrre il prodotto in un pezzo unico.
 - E' più facile fabbricare dei singoli pezzi ed assemblarli successivamente.
 - Il prodotto è stato tagliato o dissassemblato per riparazioni o manutenzione.
 - Si vogliono delle proprietà differenti in diverse zone non ottenibili con un unico materiale
 - E più economico trasportare il prodotto diviso in pezzi da assemblare sul posto.

Tipi di giunzioni

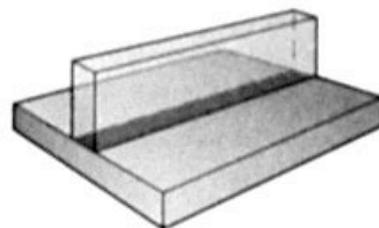
- Possiamo suddividere le giunzioni in alcune categorie principali:
 - saldatura per fusione (fusion welding): fanno parte di questo processo le saldature ad arco, e high-energy-beam (con fascio ad alta energia);
 - saldature allo stato solido (solid-state welding): la saldatura viene eseguita senza fusione, tipo saldature a freddo, ad ultrasuoni, per attrito, a resistenza elettrica, per esplosione e diffusion bonding;
 - brasatura e saldo-brasatura dove si usa un metallo bassofondente apportato esternamente;
 - incollaggi utilizzando adesivi;
 - giunzioni meccaniche con rivetti, bulloni, ganci e fissaggi vari.

Caratteristiche delle giunzioni

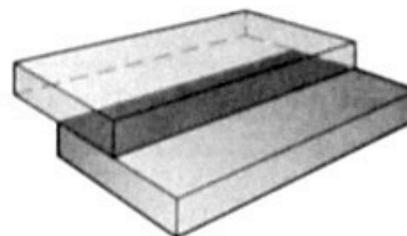
- Possiamo avere diversi tipi di giunzioni:



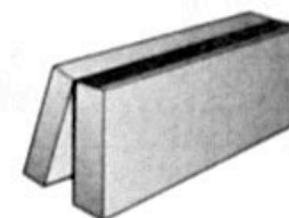
(b) Corner joint



(c) T joint



(d) Lap joint



(e) Edge joint

- per ogni tipo di giunzione possiamo avere differenti sistemi di giunzione più efficaci.
- Nella selezione del metodo di giunzione sono importanti le caratteristiche di quest'ultima come dimensioni, forme, resistenza richiesta, ispezionabilità, durata, inerzia chimica...

Comparazione di alcuni metodi di giunzione

Comparison of Various Joining Methods

Method	Characteristics								
	Strength	Design Variability	Small Parts	Large Parts	Tolerances	Reliability	Ease of Maintenance	Visual Inspection	Cost
Arc welding	1	2	3	1	3	1	2	2	2
Resistance welding	1	2	1	1	3	3	3	3	1
Brazing	1	1	1	1	3	1	3	2	3
Bolts and nuts	1	2	3	1	2	1	1	1	3
Riveting	1	2	3	1	1	1	3	1	2
Fasteners	2	3	3	1	2	2	2	1	3
Seaming, crimping	2	2	1	3	3	1	3	1	1
Adhesive bonding	3	1	1	2	3	2	3	3	2

Note: 1, very good; 2, good; 3, poor.

Processi di giunzione a fusione

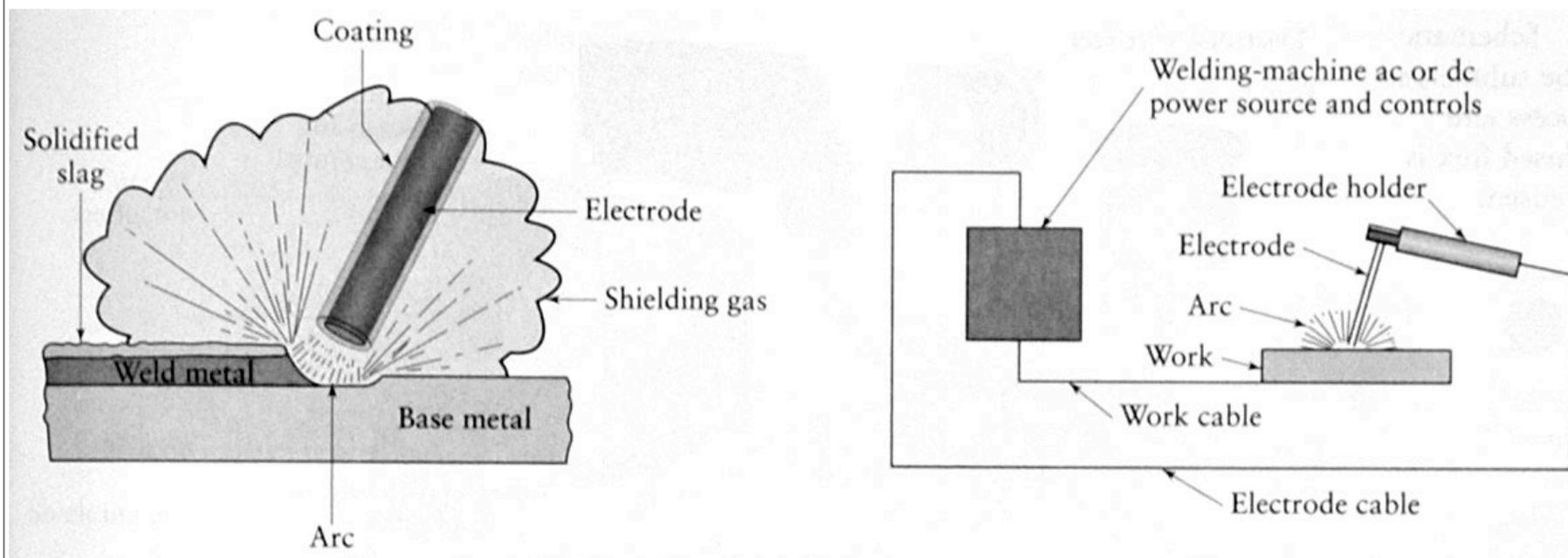
General Characteristics of Joining Processes

Joining Process	Operation	Advantage	Skill Level Required	Welding Position	Current Type	Distortion*	Cost of Equipment
Shielded metal arc	Manual	Portable and flexible	High	All	ac, dc	1 to 2	Low
Submerged arc	Automatic	High deposition	Low to medium	Flat and horizontal	ac, dc	1 to 2	Medium
Gas metal arc	Semiautomatic or automatic	Works with most metals	Low to high	All	dc	2 to 3	Medium to high
Gas tungsten arc	Manual or automatic	Works with most metals	Low to high	All	ac, dc	2 to 3	Medium
Flux-cored arc	Semiautomatic or automatic	High deposition	Low to high	All	dc	1 to 3	Medium
Oxyfuel	Manual	Portable and flexible	High	All	-	2 to 4	Low
Electron beam, laser beam	Semiautomatic or automatic	Works with most metals	Medium to high	All	-	3 to 5	High

* 1, highest; 5, lowest

Processi ad arco, elettrodo consumabile: SMAW

- Saldatura ad arco schermato (shielded metal arc-welding o SMAW)
- E' il più usato, circa il 50% delle saldature industriali e per manutenzione.

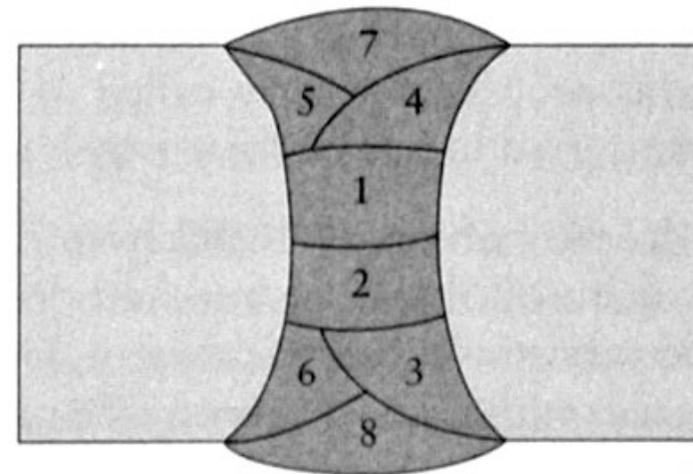


Saldatura ad arco schermato (SMAW)

- L'elettrodo è formato da una bacchetta lunga metallica rivestita da un ossido.
- L'arco voltaico si genera tra la punta dell'elettrodo e il pezzo al tocco e prosegue poi mantenendo i due ad una distanza sufficientemente corta.
- Il calore generato dalla scarica fonde il metallo del pezzo, la punta dell'elettrodo e le sostanze del rivestimento che si riduce generando un gas protettivo. Il metallo fuso solidifica sul pezzo nell'area di saldatura.
- Si usano correnti continue o alternate tra 50 e 300 A, potenze inferiori a 10 kW e il sistema è portatile.
- Con lamiere sottili si usa corrente continua (cc) in polarità diretta (elettrodo negativo).
- Per saldature profonde si usa cc in polarità inversa.

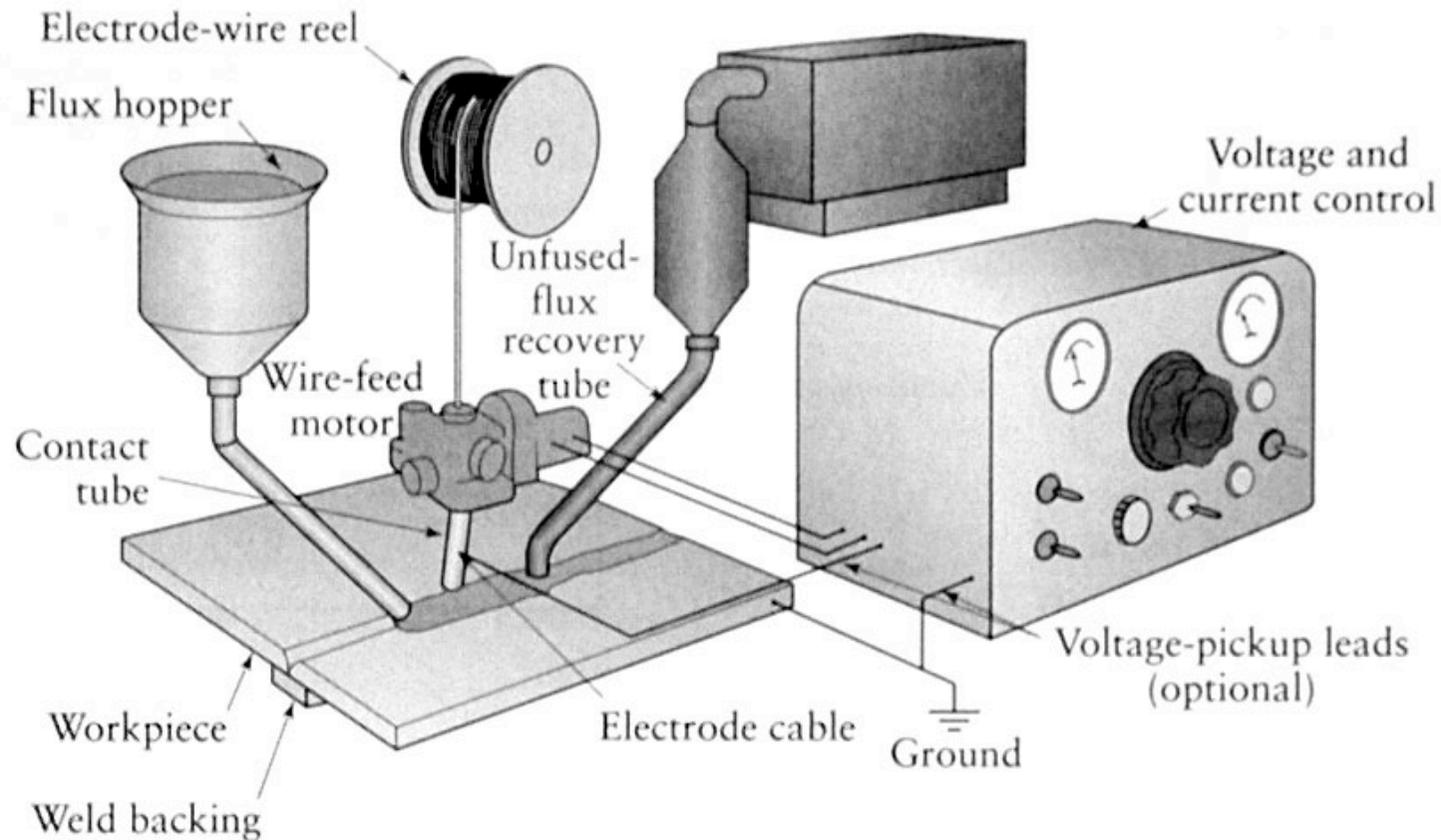
Saldatura ad arco schermato (SMAW)

- Corrente alternata si usa per sezioni spesse e con elettrodi di diametro largo (apportano più materiale).
- Con spessori di saldatura elevati si procede a più passate, ma bisogna rimuovere la scoria superficiale dopo ogni passata, per evitare rotture e corrosioni.
- In questo esempio vediamo come vanno alternate le passate per ridurre al minimo le distorsioni.
- Correnti basse danno fusioni incomplete, correnti troppo elevate danneggiano il rivestimento dell'elettrodo.



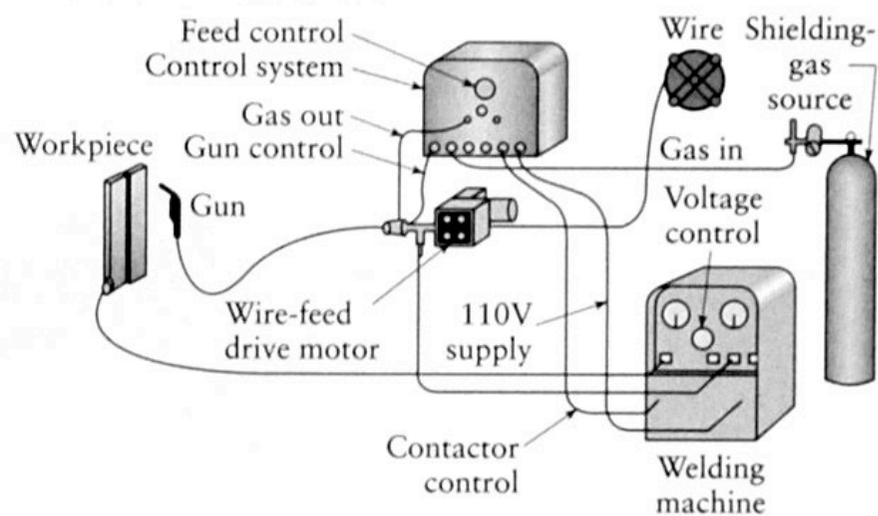
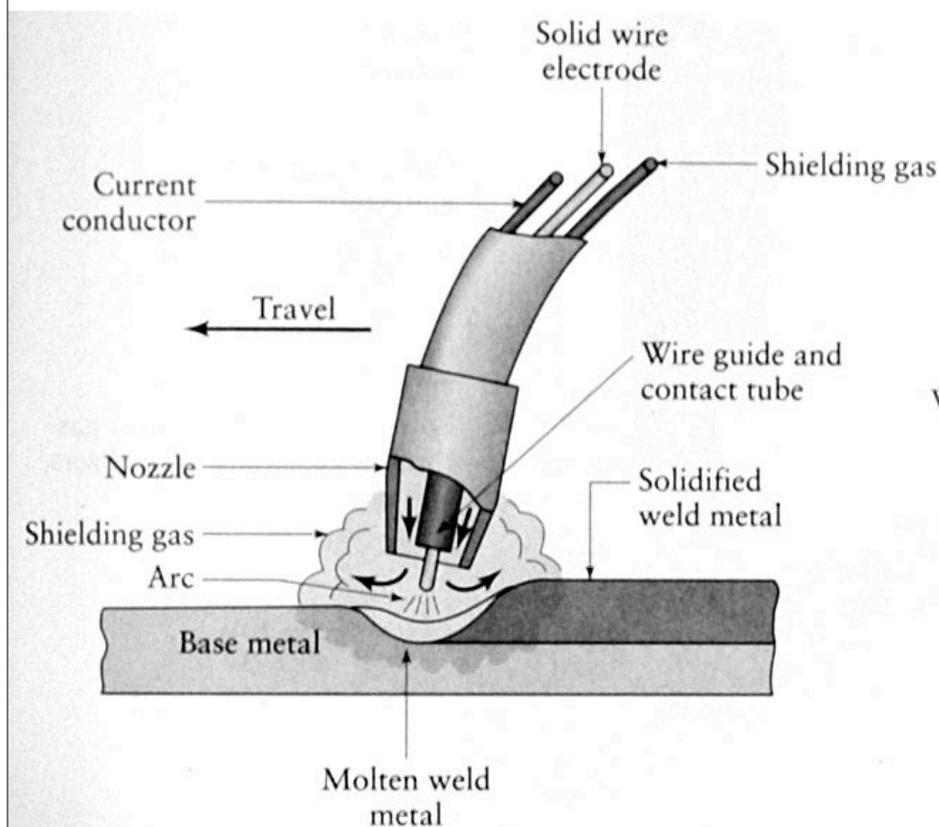
Processi ad arco, elettrodo consumabile: SAW

- Saldatura ad arco sommerso (SAW): processo molto veloce (4-10 volte lo SMAW) in cui si protegge il fuso con un flusso di polvere di calcite, silice, ossidi di manganese e altri in caduta per gravità. Si usa solo orizzontalmente.



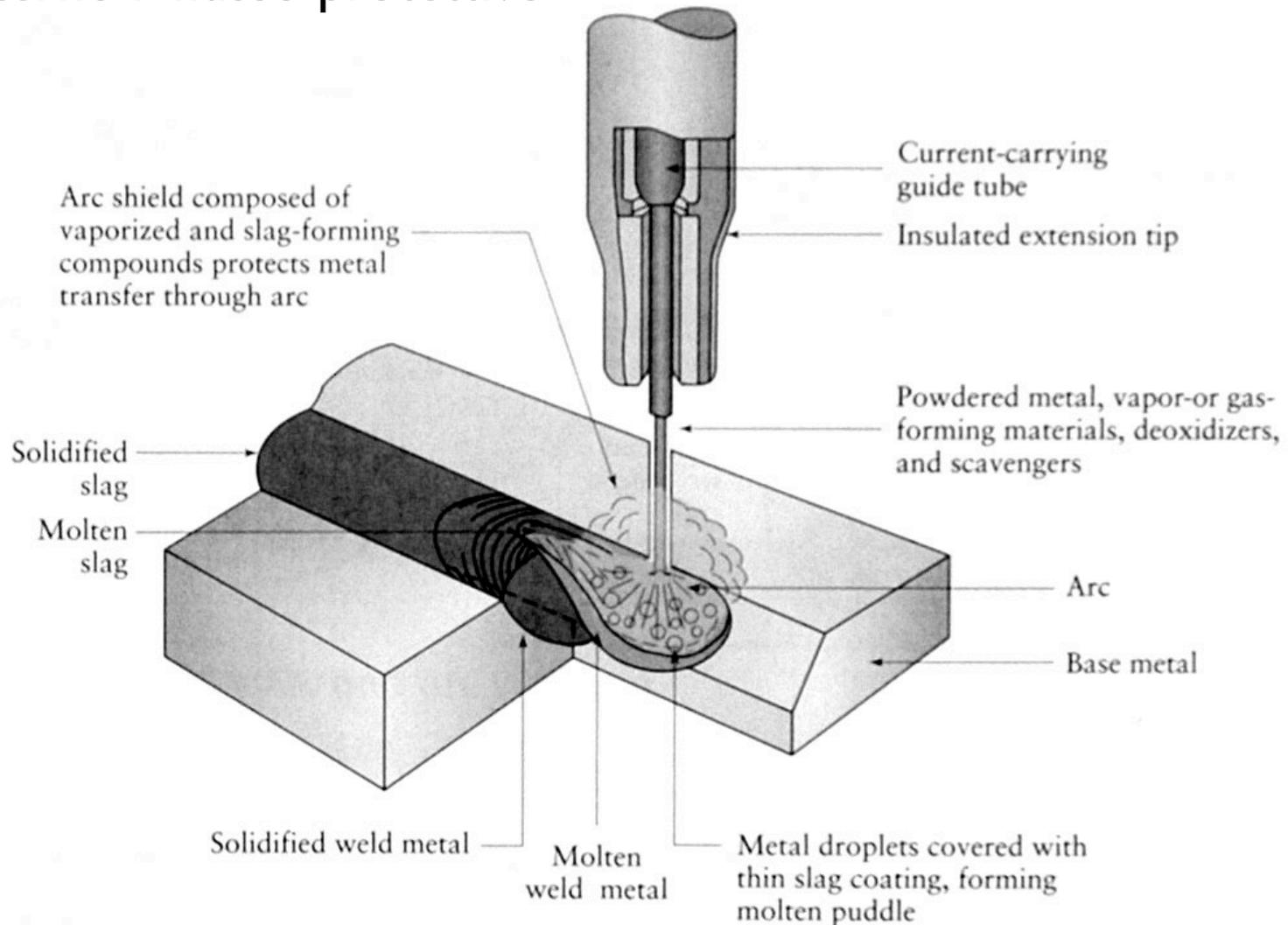
Processi ad arco, elettrodo consumabile: GMAW

- Gas metal-arc welding (GMAW o MIG welding, metal inert gas): l'area di saldatura viene schermata da un gas protettivo apportato esternamente. Il metallo può essere trasferito a piccole gocce o grossi globuli. Il processo è più veloce dello SMAW



Processi ad arco, elettrodo consumabile: FCAW

- Flux-cored arc welding (FCAW): elettrodo tubolare con all'interno il flusso protettivo

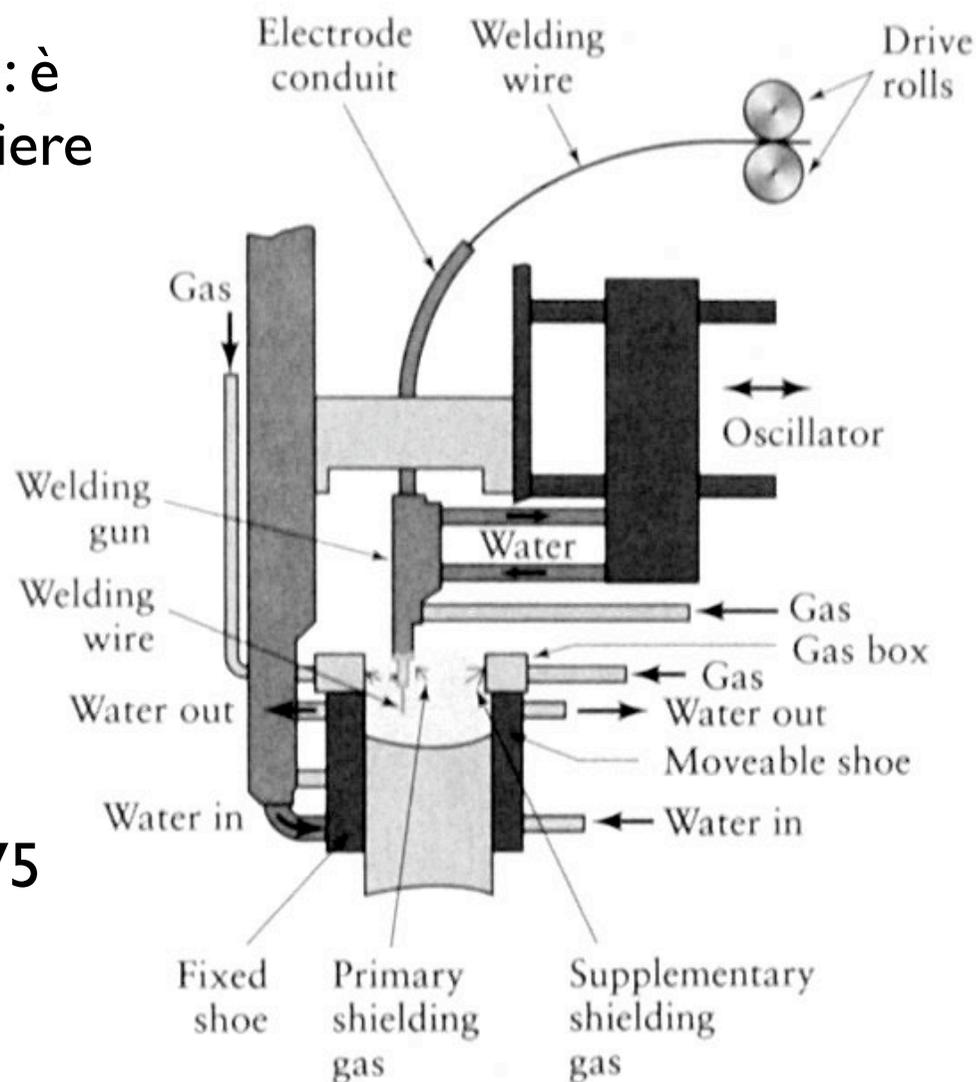


Vantaggi del FCAW

- Elettrodi che producono un arco più stabile (potenza 20kW).
- Il fondente (flux) interno è meno fragile del rivestimento dello SMAW e si possono produrre lunghi elettrodi arrotolati per produzioni continue.
- Non richiedono gas protettivi, il gas come nello SMAW deriva dal fondente che produce poi anche la scoria.
- Processo flessibile come lo SMAW, economico e automatizzabile. In crescita veloce nell'industria.
- Deposizioni più elevate del GMAW.
- Utilizzabile per sezioni sottili con elettrodi tubolari sottili.
- Composizioni in lega facilmente aggiustabili per apporto nel fondente.

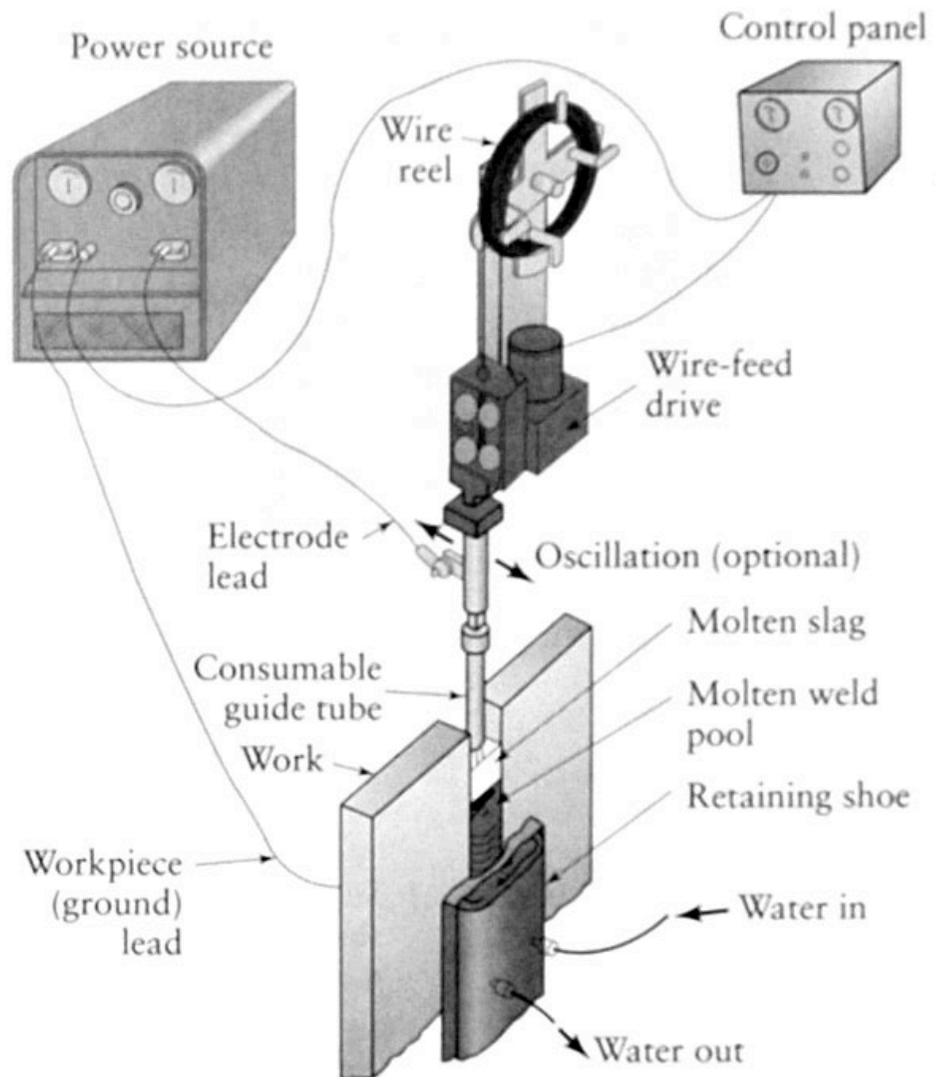
Processi ad arco, elettrodo consumabile: EGW

- Elettrogas welding (EGW): è usato per saldare due lamiere accostate a spigolo (butt welding) verticalmente.
- Due pannelli raffreddati scorrono verso l'alto insieme all'elettrodo e sistema, contenendo il fuso. Si saldano anche tubi ruotandoli.
- Saldano spessori da 12 a 75 mm in acciaio, titanio e alluminio.



Processi ad arco, elettrodo consumabile: ESW

- Elettroslag welding (ESW): simile al precedente.
- L'arco viene innestato tra l'apice dell'elettrodo e il fondo delle lamiere.
- Si saldano lamiere da 50 a 900 mm. La velocità di saldatura è circa pari a 12-36 mm/min.
- L'arco si spegne quando la scoria raggiunge l'elettrodo.



Elettrodi per saldatura ad arco

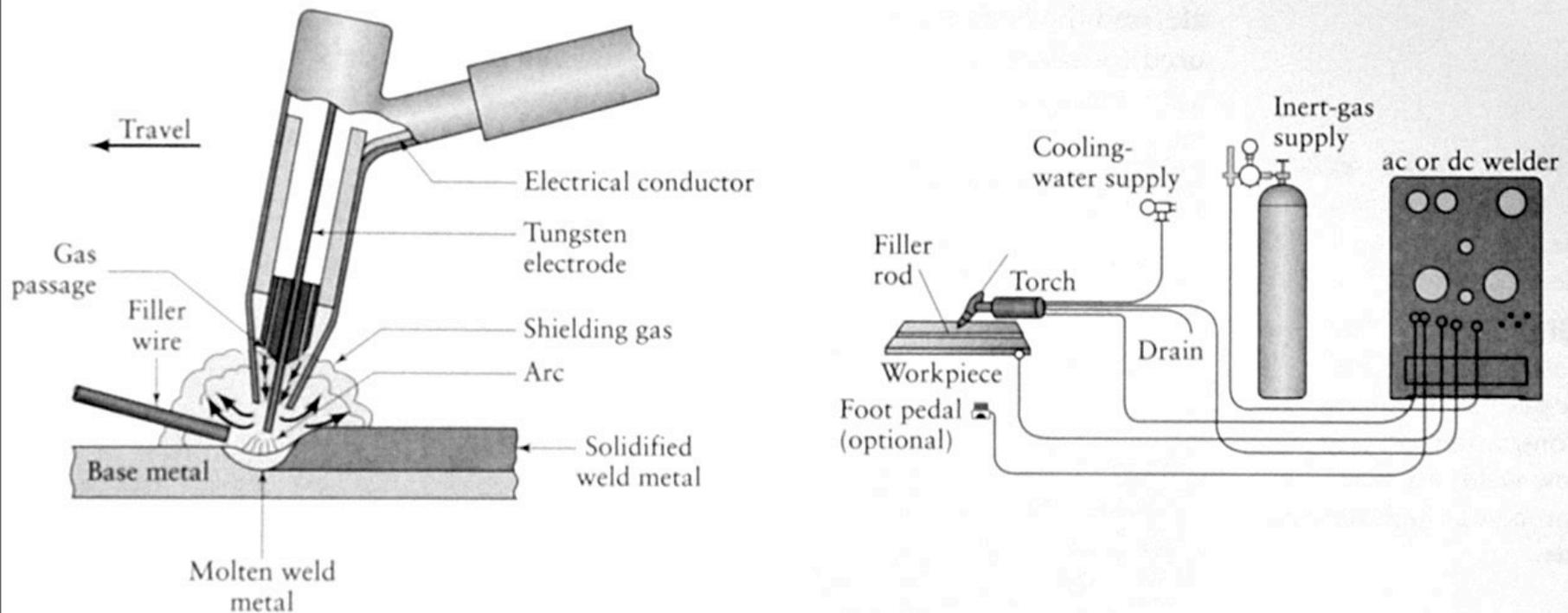
- Gli elettrodi sono classificati in base a (tramite codici numerici e lettere oppure colore):
 - resistenza della lega di saldatura
 - corrente (continua o alternata)
 - tipo di rivestimento
- Le dimensioni tipiche sono da 150 a 460 mm di lunghezza per 1.5-8 mm di diametro.
- Elettrodi più sottili richiedono correnti più basse.
- Gli elettrodi sono sottoposti alle standardizzazioni internazionali.

Rivestimenti degli elettrodi

- Gli elettrodi sono rivestiti con materiale argilloso contenente ossidi, carbonati, fluoruri, leghe metalliche e cellulosa. La sua funzione è di:
 - stabilizzare l'arco
 - generare del gas protettivo (CO_2 , vapor d'acqua, CO e idrogeno in piccole quantità)
 - controllare la velocità di fusione dell'elettrodo
 - produrre una scoria (slag) che protegga la saldatura dall'ossidazione, nitrurazione e inclusioni
 - apportare elementi in lega alla zona saldata, compresi deossidanti per prevenire fragilimenti
- Dopo ogni passata la scoria va rimossa.

Processi ad arco, elettrodo non consumabile:TIG

- Gas tungsten-arc welding (GTAW o TIG, tungsten inert gas): il metallo è apportato esternamente tramite filo metallico (in alcuni casi con giunti chiusi non si apporta metallo). Non si usa fondente (flux), ma elio e/o argon per schermare. L'elettrodo in tungsteno non si consuma produce un arco stabile (distanza).

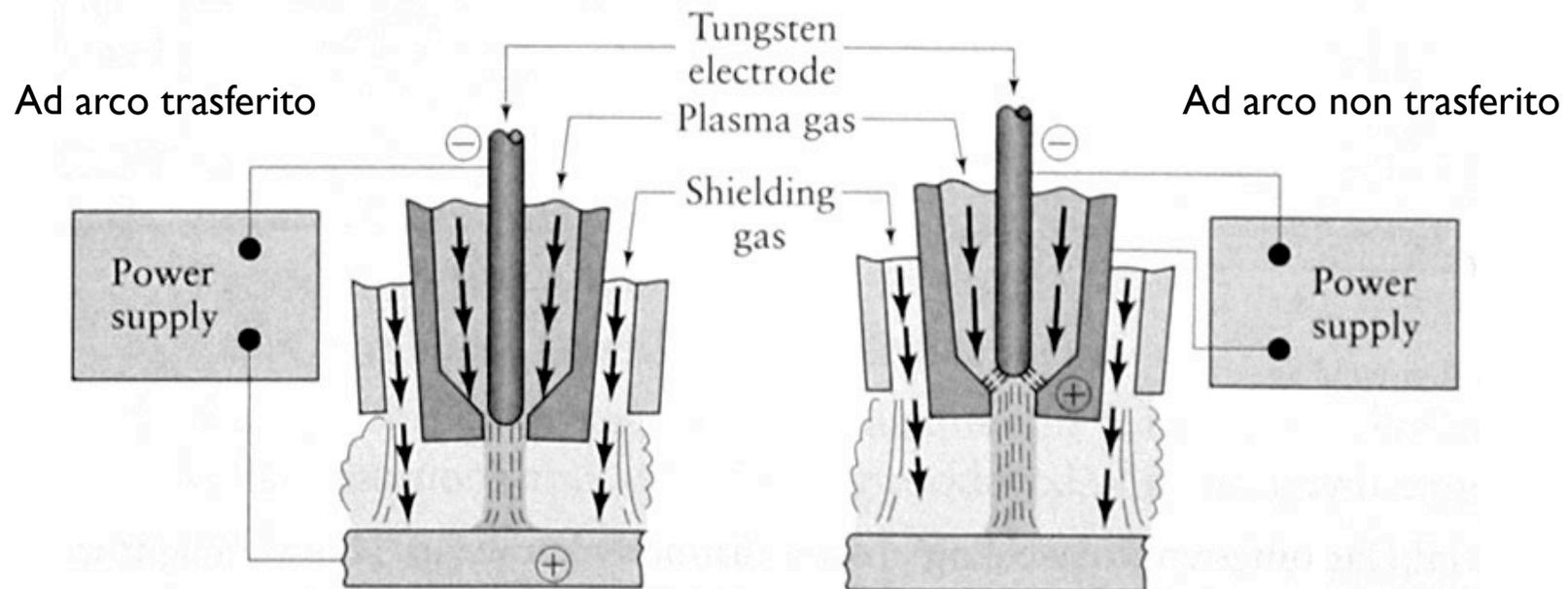


Processi ad arco, elettrodo non consumabile:TIG

- Si usano correnti continue a circa 200 A o alternate a 500 A. Potenze da 8 kW a 20 kW.
- Si usa corrente alternata per alluminio e magnesio per la sua azione pulitrice di rimozione degli ossidi.
- Bisogna evitare il contatto dell'elettrodo in tungsteno con il metallo fuso per evitare contaminazioni del primo.
- Ha un costo elevato a causa del gas inerte, ma produce saldature di alta qualità.
- Si usa molto con leghe Al, Mg e Ti.

Processi ad arco, elettrodo non consumabile

- Atomic-hydrogen welding (AHW): l'arco è prodotto tra due elettrodi in tungsteno, l'idrogeno apportato si decompone atomicamente e sul metallo freddo si ricompone cedendo calore e fondendo il metallo.
- Plasma-arc welding (PAW): un arco voltaico riscalda e porta allo stato di plasma il gas che fluisce ad alta velocità e riscalda con una fiamma molto concentrata a $T > 30000^{\circ}\text{C}$.



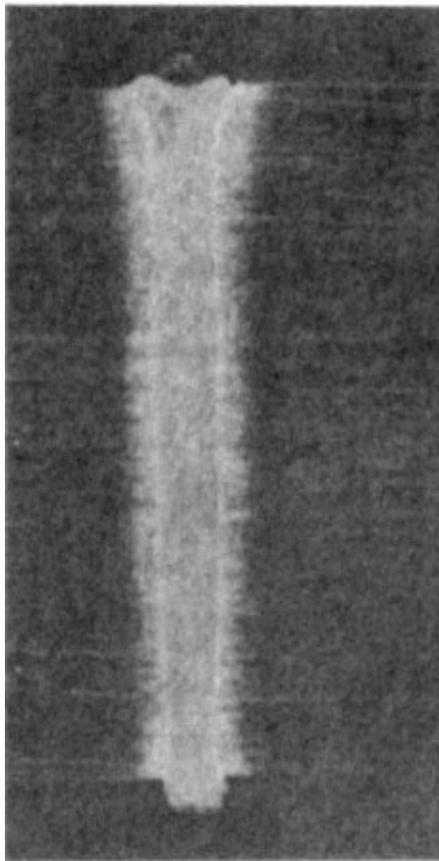
High-Energy-Beam welding: EBW

- Electron-beam welding (EBW): un fascio di elettroni sottile ad alta energia viene focalizzato sul pezzo da saldare che viene fuso dall'energia cinetica che si trasforma in calore. Il processo è condotto in vuoto.
- Il processo produce saldature di alta qualità con un alto rapporto profondità/sezione (da 10 a 30).
- Velocità molto elevate fino a 12 m/min con minime distorsioni.
- L'alta potenza (fino a 100 kW) può produrre anche buchi nel pezzo.
- Applicazioni tipiche vanno da saldature in aeronautica, missilistica, nucleare al settore microelettronico e automobilistico.

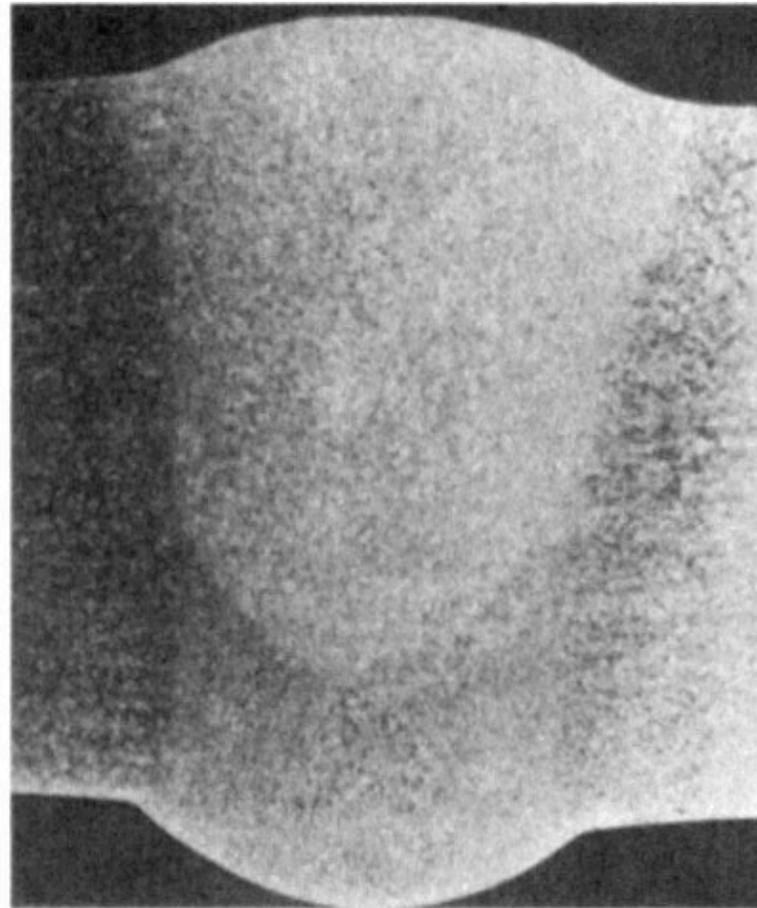
Confronto EBW-GTAW

Dimensione zona di saldatura:

EBW

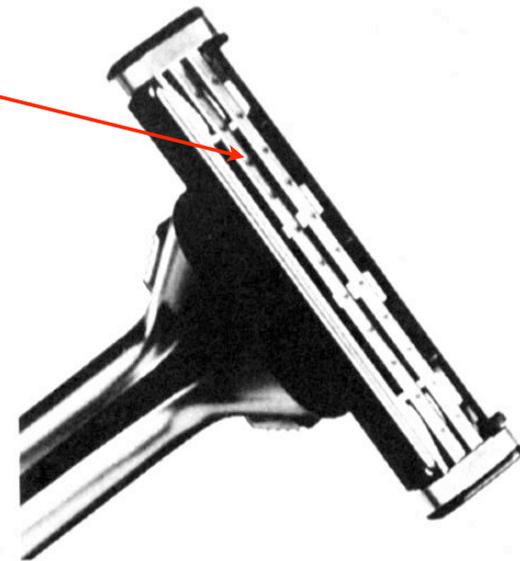


GTAW



High-Energy-Beam welding: LBW

- Laser-beam welding (LBW): il calore di fusione viene fornito da un laser ad alta potenza. Come per l'EBW, si può concentrare l'energia in un'area molto piccola dando origine a saldature profonde e strette. Il rapporto profondità/sezione va da 4 a 10. Potenze fino a 100 kW.
- Se usato in pulsii nel range dei millisecondi si possono fare delle saldature a spot:
- In continuo si usa per saldature profonde in sezioni spesse.
- Si usa con ossigeno per acciai e gas inerti con leghe non-ferrose.
- Velocità fino a 80 m/min

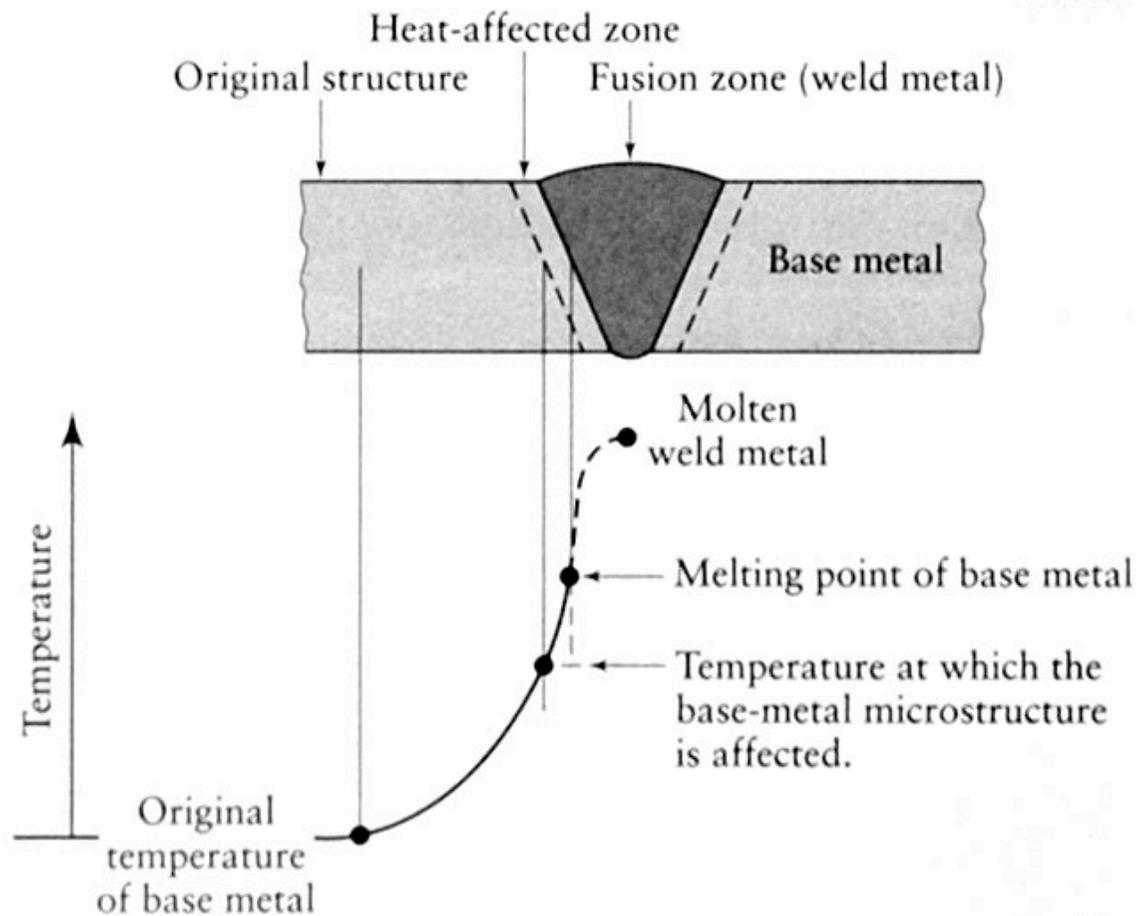


Vantaggi LBW

- Produce saldature di buona qualità, minimo ritiro e distorsione, senza porosità. Si usa dalla saldatura di trasmissioni alle lamiere per pannelli nel campo automobilistico (tailor-welded blanks).
- Vantaggi dell'LBW sull'EBW:
 - Non richiede il vuoto
 - Il fascio può essere focalizzato otticamente, utilizzando per esempio fibre ottiche e facilmente manipolato
 - Non genera raggi-x come l'EBW
 - La qualità della saldatura è migliore con meno tendenza alla fusione incompleta, spatter, porosità e distorsioni.

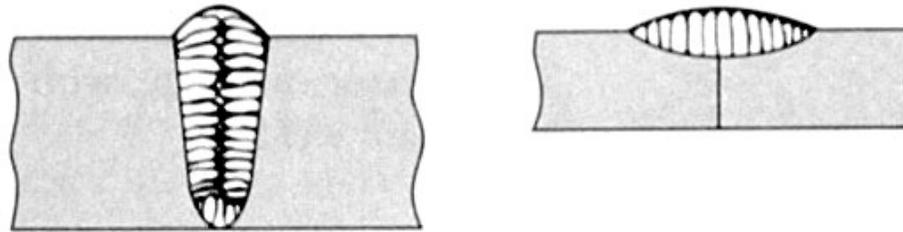
Il giunto saldato per fusione

- Caratteristiche del giunto:

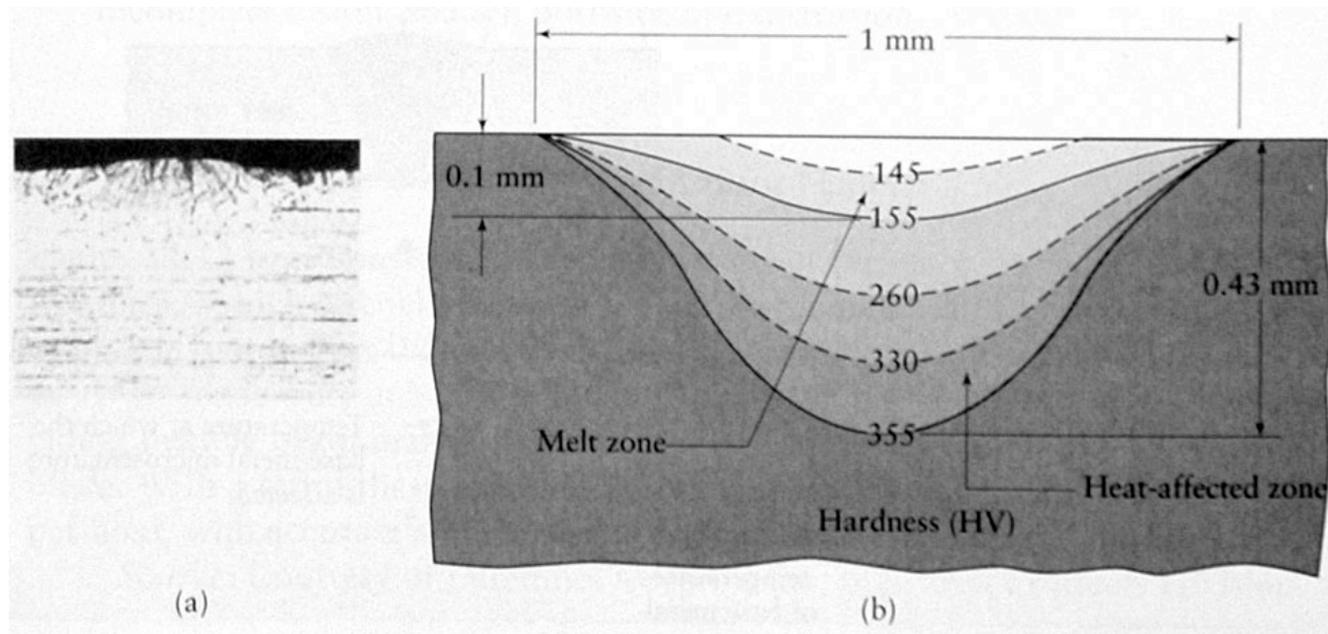


La zona di fusione

- Nella zona di fusione dove avviene la solidificazione si formano i grani dendritici paralleli al flusso di calore.



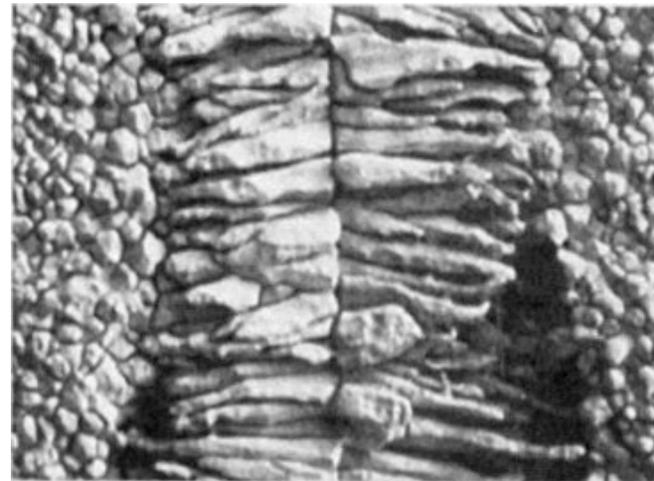
- La durezza cresce dall'esterno verso l'interno.



The heat-affected zone (HAZ)

- Nella zona alterata per riscaldamento dalla saldatura la microstruttura e composizione chimica può venir alterata causando problemi al materiale e pezzo.
- In particolare si altera la grana cristallina che cresce diminuendo le proprietà meccaniche. Inoltre diffusione e segregazioni della zona di fusione alterano la composizione chimica e possono dare origine a corrosione.

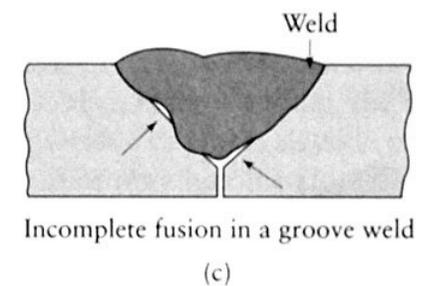
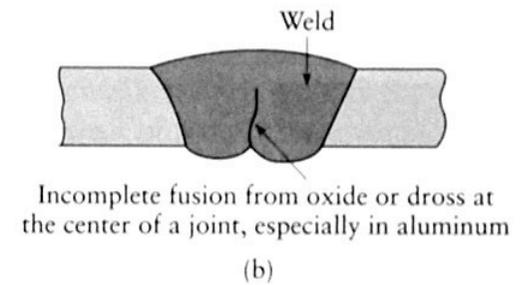
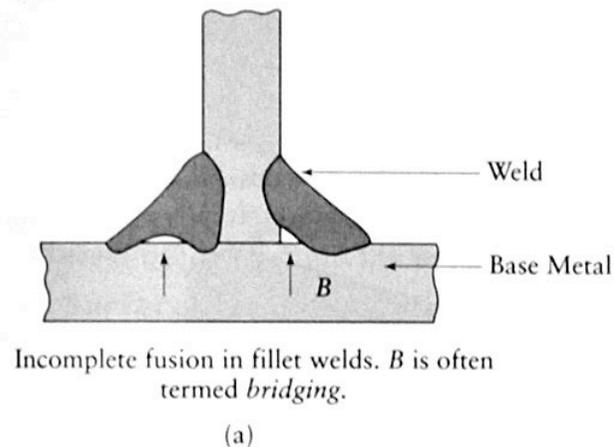
Corrosione intergranulare
in una saldatura



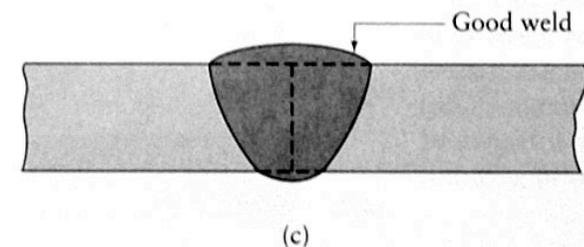
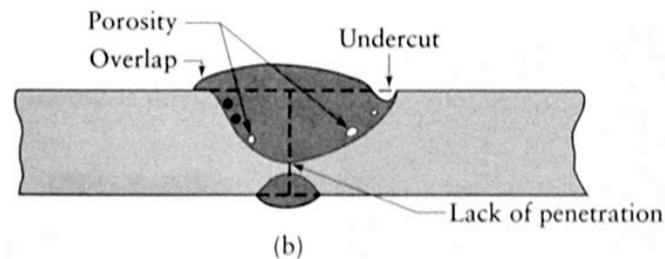
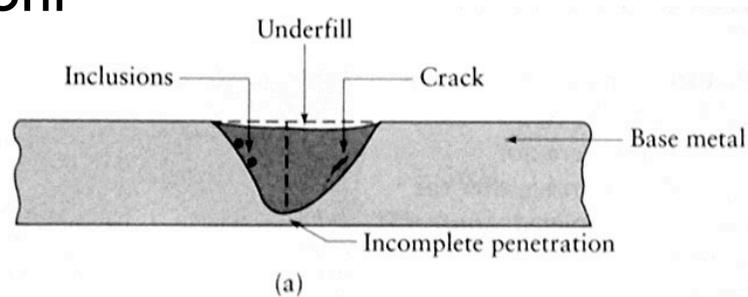
Qualità della saldatura

- I difetti maggiori che influiscono sulla qualità di una saldatura sono:
 - porosità, questa può venir ridotta tramite:
 - propria selezione dell'elettrodo e del metallo da apportare
 - preriscaldamento zona da saldare o maggior apporto calore
 - pulitura zona da saldare e controllo contaminanti
 - rallentare la velocità di saldatura per dare tempo ai gas di scappare
 - Inclusioni di scoria, si riduce tramite:
 - pulitura tra una passata e l'altra
 - sufficiente gas di schermatura
 - riprogettazione opportuna del giunto per permettere facile rimozione
 - Incompleta fusione o penetrazione, si controlla tramite:
 - aumento temperatura pezzo e gas di schermatura
 - pulitura della zona da saldare
 - cambio disegno del giunto e tipo di elettrodo
 - maggior apporto di calore e diminuire la velocità di saldatura
 - cambio disegno del giunto e miglior fit delle superfici da saldare

Qualità della saldatura

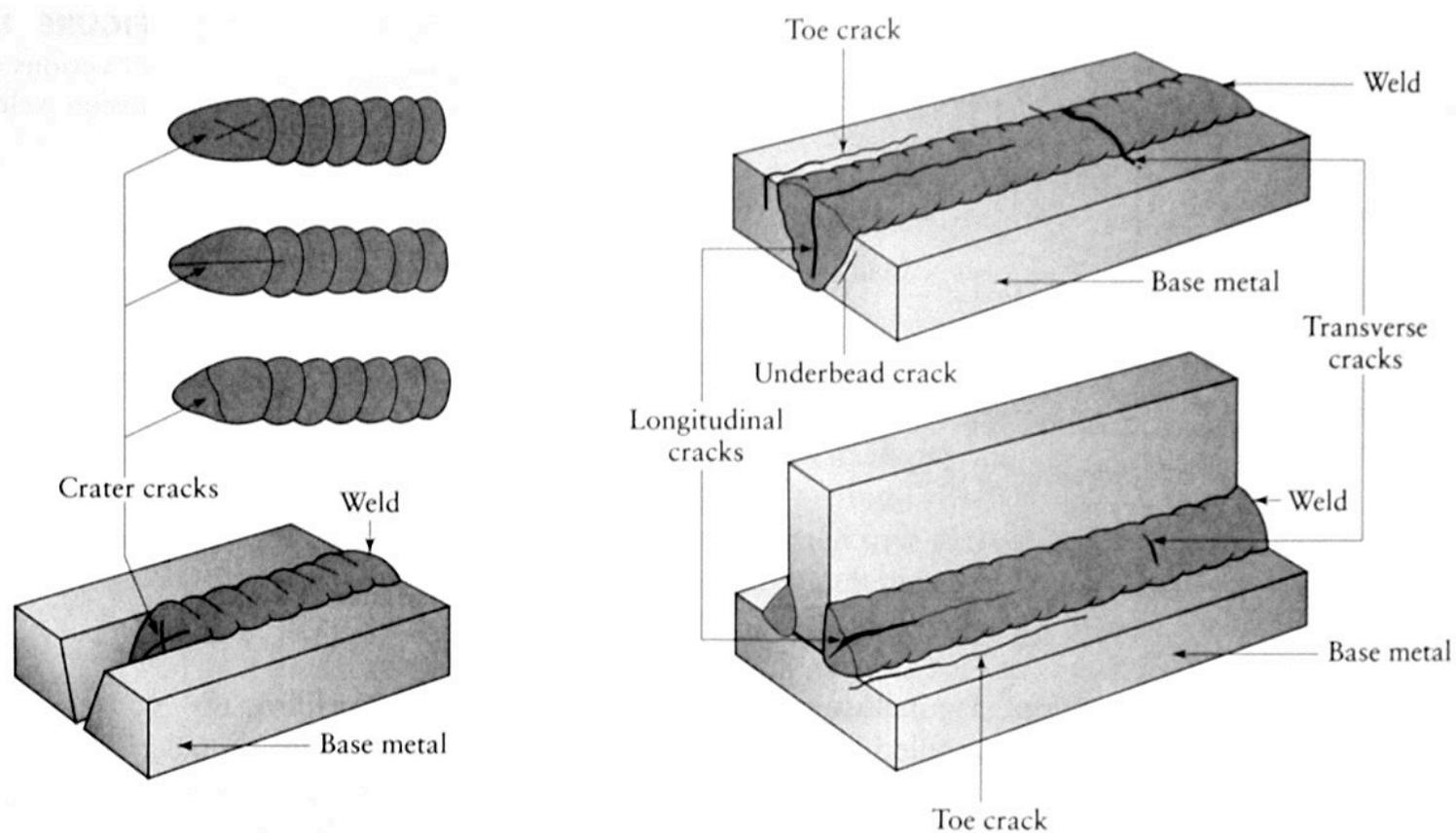


- Profilo di saldatura: il profilo di saldatura può indicare fusioni incomplete o inclusioni.



Qualità della saldatura

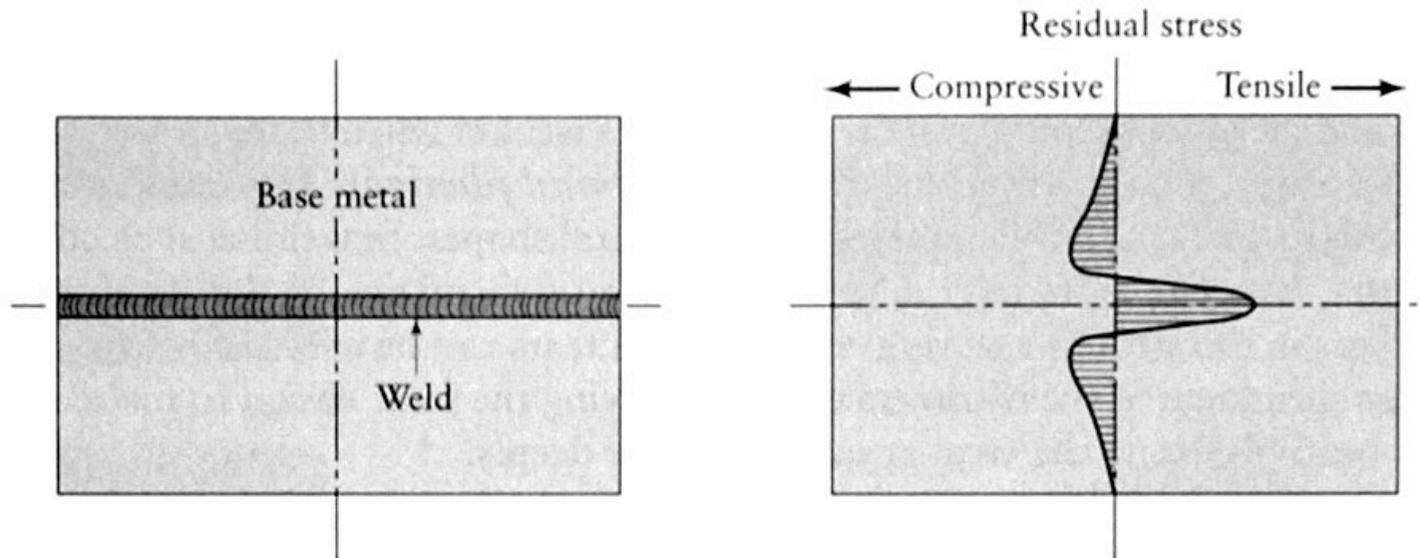
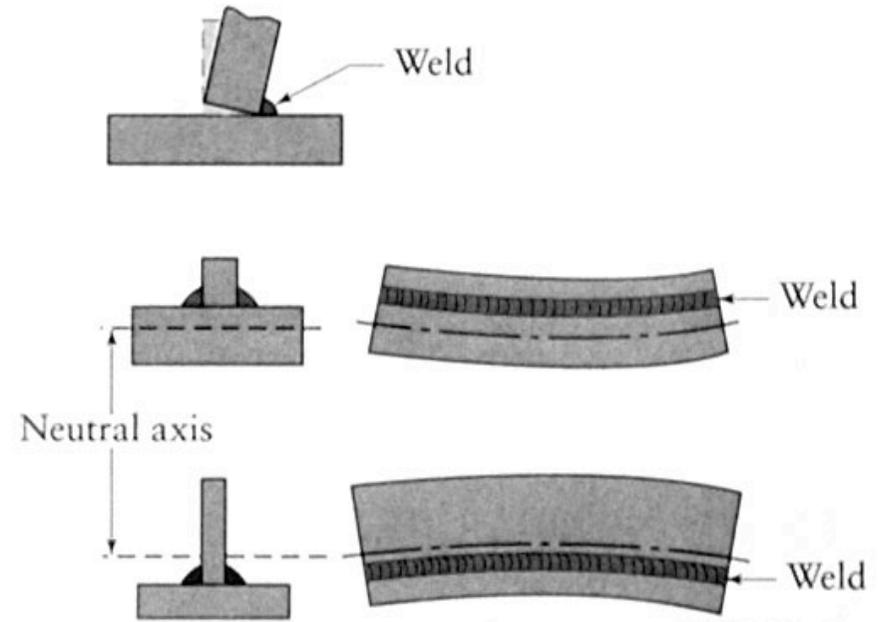
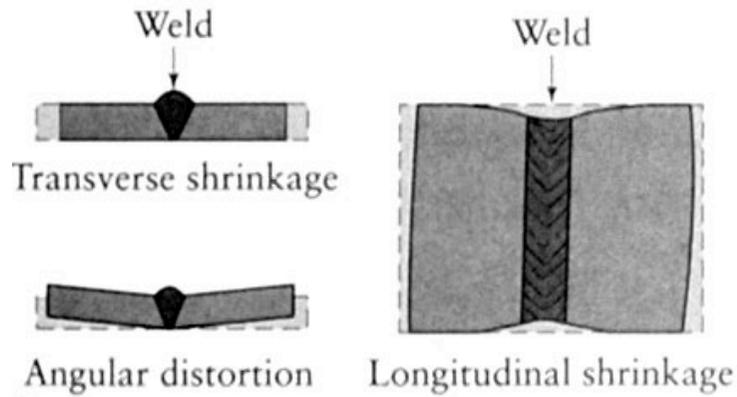
- Cricche sono causate da stress termici da gradienti di temperatura, variazioni di composizione, infragilimento bordi grano per segregazione, infragilimento da idrogeno, impossibilità del fuso di contrarsi propriamente.



Qualità della saldatura

- Altri difetti che troviamo sono:
 - lacerazioni lamellari: si sviluppano nella saldatura di laminati a causa dell'anisotropia
 - danneggiamenti superficiali: dovuti a gocce di fuso ed errori di saldatura
 - sforzi residui: dovuti al riscaldamento e raffreddamento causano:
 - distorsioni, incurvamenti e buckling
 - corrosione sotto stress
 - ulteriori distorsioni per rimozioni di parti della saldatura
 - riducono la resistenza a fatica
- Gli stress possono venir rilasciati con opportuni trattamenti termici o per deformazione plastica e ridotti preriscaldando il pezzo da saldare.
- I trattamenti termici ripristinano anche la microstruttura

Sforzi residui nella saldatura



Saldabilità

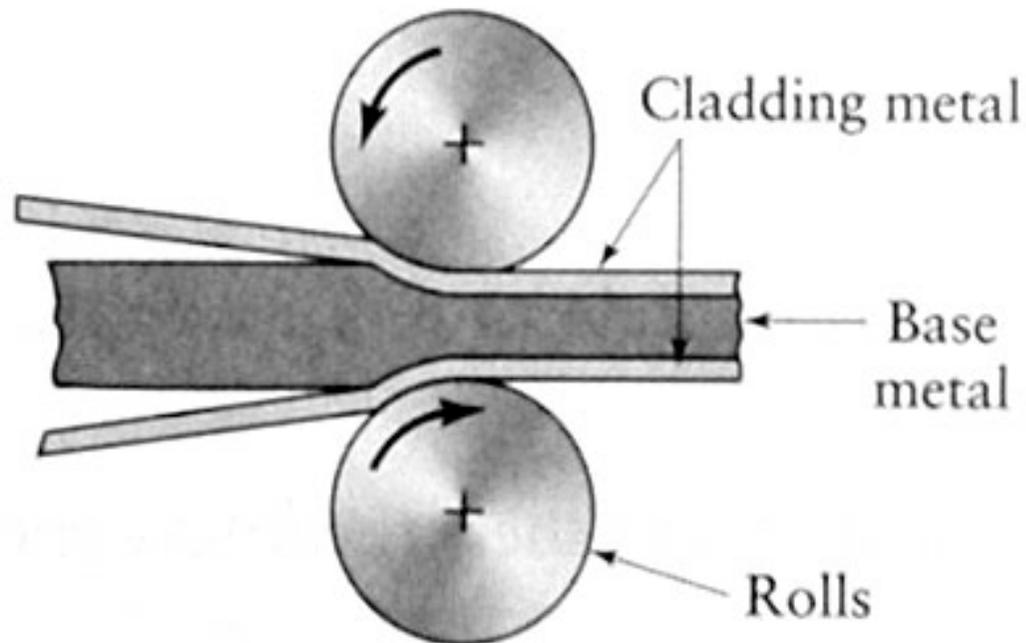
- Leghe alluminio: saldabili con apporto di calore elevato, non saldabili quelle con zinco o rame
- Ghise: generalmente saldabili
- leghe rame: come leghe Al
- piombo: facile da saldare
- leghe magnesio: saldabili con gas e fondenti protettivi
- Molibdeno: saldabile in condizioni controllate
- Leghe Ni: saldabili, vari processi
- Nb: saldabili in condizioni controllate
- Acciai inox: saldabili, vari processi
- Acciai galvanizzati: meno saldabili per la presenza dello Zn

Saldabilità

- Acciai alto legati: saldabili bene in condizioni controllate
- Acciai basso legati: da bassa a buona saldabilità
- Acciai basso carbonio: eccellente saldabilità, meno crescendo il carbonio
- Tantalio: saldabile in condizioni controllate
- Stagno: facilmente saldabile
- leghe Ti: saldabili con gas di schermatura
- Tungsteno: saldabile in condizioni ben controllate
- Zinco: difficile da saldare, meglio usare metalli bassofondenti
- Zirconio: saldabile con schermatura gas

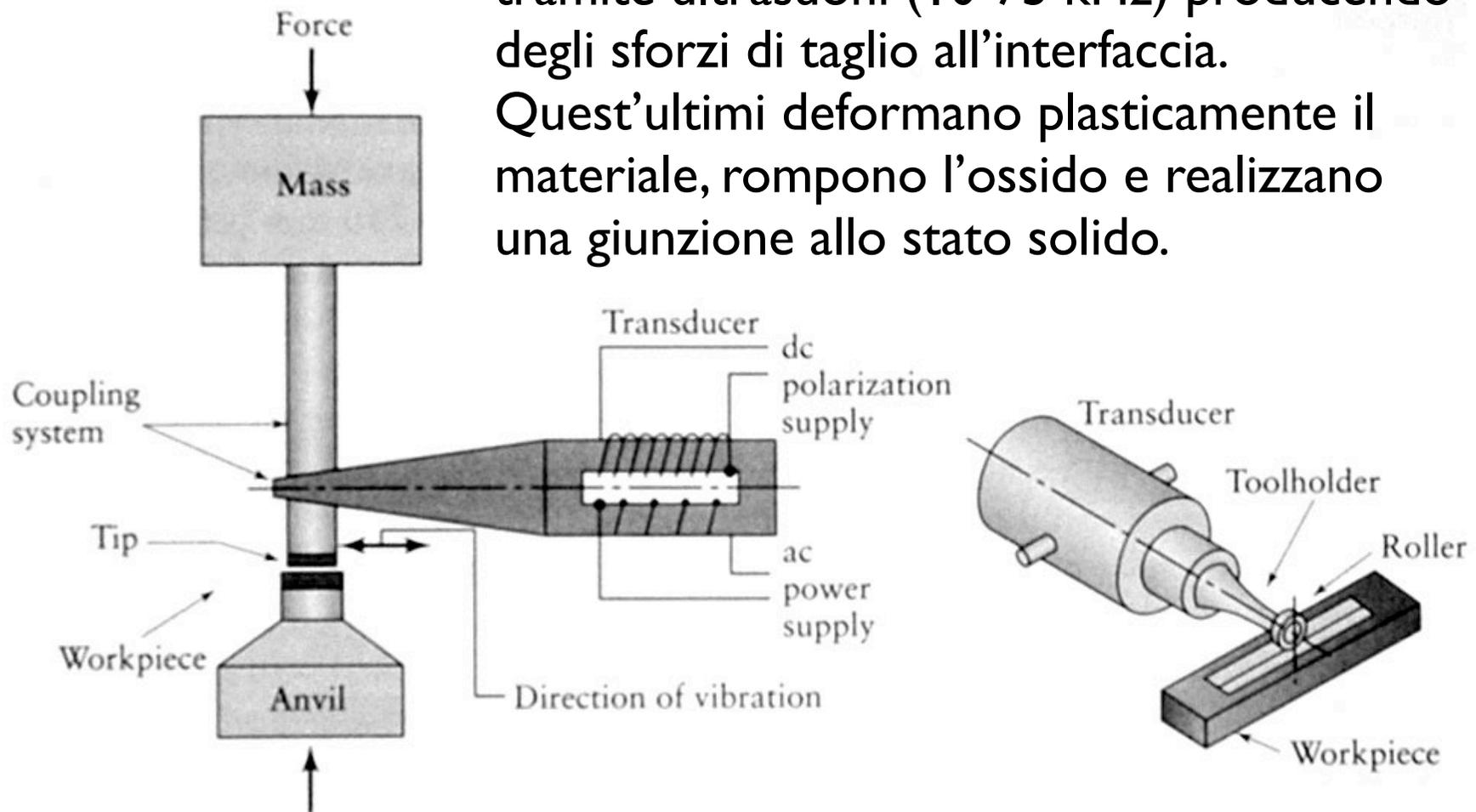
Sistemi di saldatura allo stato solido

- Saldatura a freddo (CW: cold welding): si esegue tramite pressione di rulli o stampi. Si usano metalli soffici, facilmente deformabili, le superfici vanno ben pulite prima dell'operazione. Un esempio è dato dal cladding (roll bonding):



Saldatura ad ultrasuoni, USW

- Ultrasonic Welding (USW): si mettono i due pezzi da saldare in compressione tra loro e si fanno oscillare tramite ultrasuoni (10-75 kHz) producendo degli sforzi di taglio all'interfaccia. Quest'ultimi deformano plasticamente il materiale, rompono l'ossido e realizzano una giunzione allo stato solido.

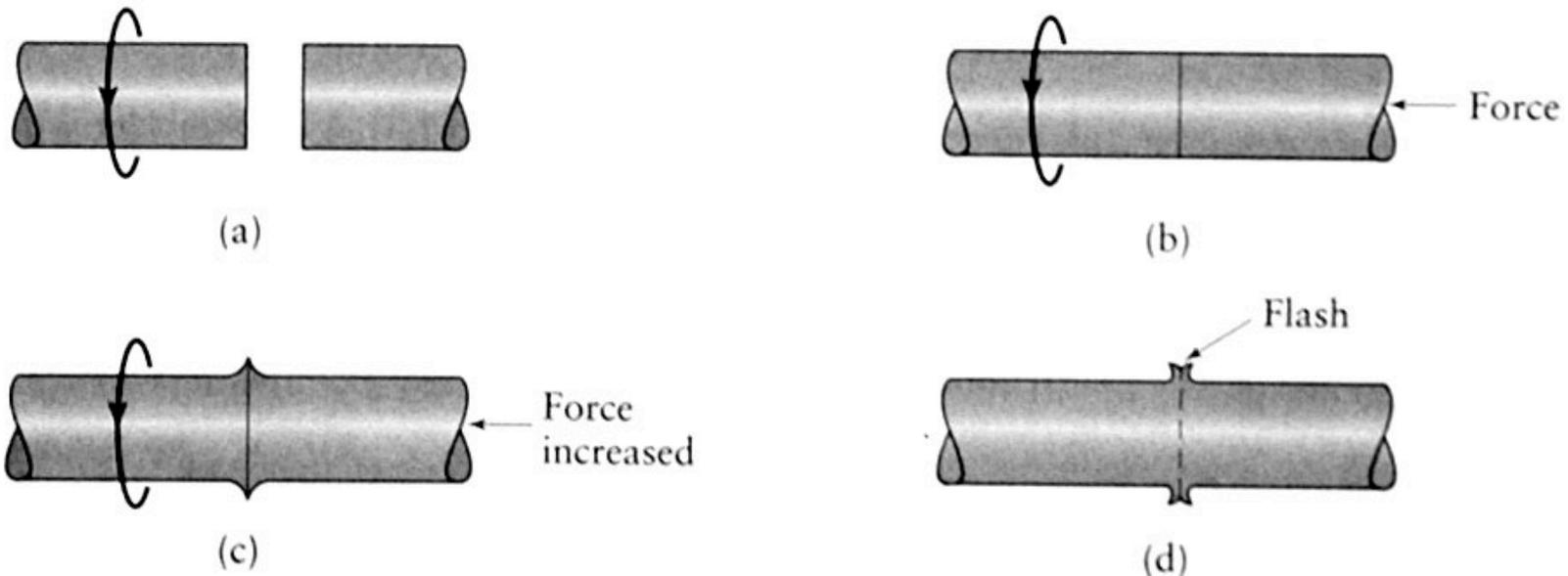


Saldatura ad ultrasuoni, USW

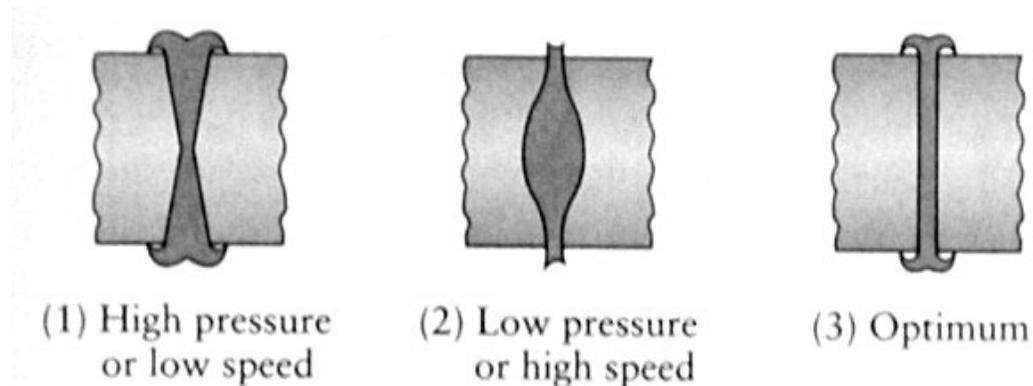
- La zona deformata e saldata raggiunge temperature in Kelvin di $1/3$ - $1/2$ la temperatura di fusione. Quindi la giunzione è allo stato solido, però si possono osservare dei mutamenti microstrutturali nella zona riscaldata.
- La saldatura ad ultrasuoni è affidabile e versatile. Si può utilizzare sia per metalli che non metalli, anche con giunzioni bimetalliche (due metalli differenti). E' molto usata per polimeri (termoplastici, dove però in questo caso avviene fusione), nel campo automobilistico e di prodotti di consumo nell'elettronica ed anche per sistemi di imballaggio con fogli sottili.

Saldatura ad attrito, FRW

- Friction Welding (FRW): si esegue tenendo fisso un pezzo e facendo ruotare ad alta velocità l'altro (a) fino a 900 m/s. Si mettono a contatto i due pezzi (b) con una certa pressione e l'attrito generato riscalda la zona dell'interfaccia. Si blocca istantaneamente la rotazione (c) (per evitare torsione e rotture) aumentando la pressione. Si genera una forte giunzione allo stato solido (d)



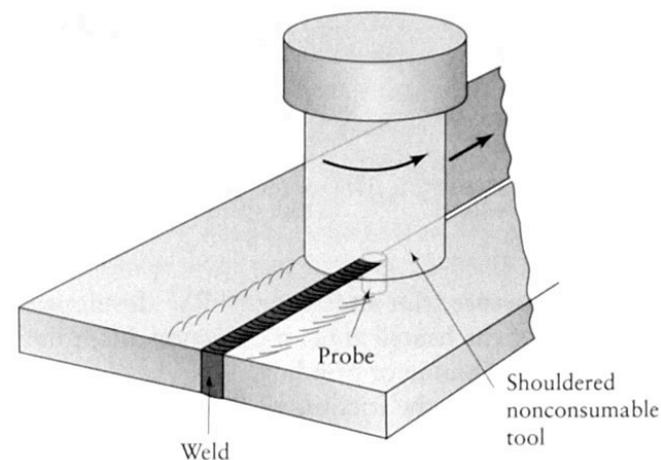
Saldatura ad attrito: FRW



- La giunzione risultante è molto sottile e la sua forma dipende dal calore generato, dalla conducibilità termica e proprietà meccaniche dei pezzi.
- Viene utilizzato per tubi fino a 250 mm e barre fino a 100 mm di diametro.
- In molti casi si sviluppa una bavatura all'interfaccia che se non voluta deve essere rimossa all'utensile.
- Esistono alcune varianti del processo:

Saldatura ad attrito: FRW

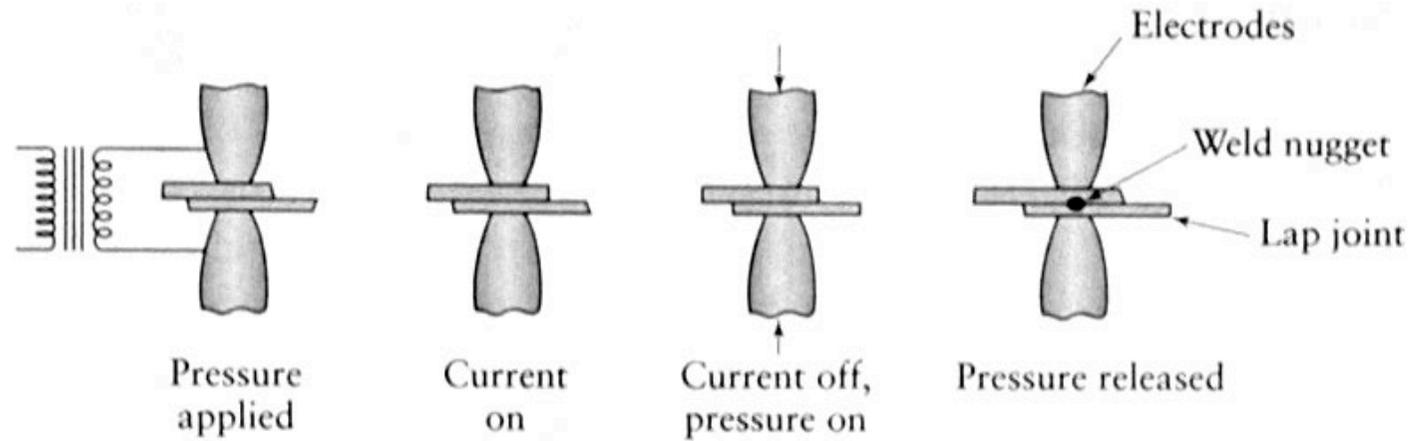
- Inertia friction welding. L'energia richiesta è fornita attraverso una ruota (volano) messa in rotazione. Un pezzo è solidale con la ruota. I pezzi vengono messi a contatto con pressione progressiva finché il volano si blocca.
- Linear friction welding. Si usa per pezzi non cilindrici o a simmetria assiale. Il movimento reciproco di slittamento è lineare. Si saldano superfici quadrate o rettangolari con frequenze ad esempio di 25 Hz.
- Friction stir welding: si utilizza un terzo corpo per generare l'attrito. Nato per leghe Al, si usa anche per polimeri e compositi.



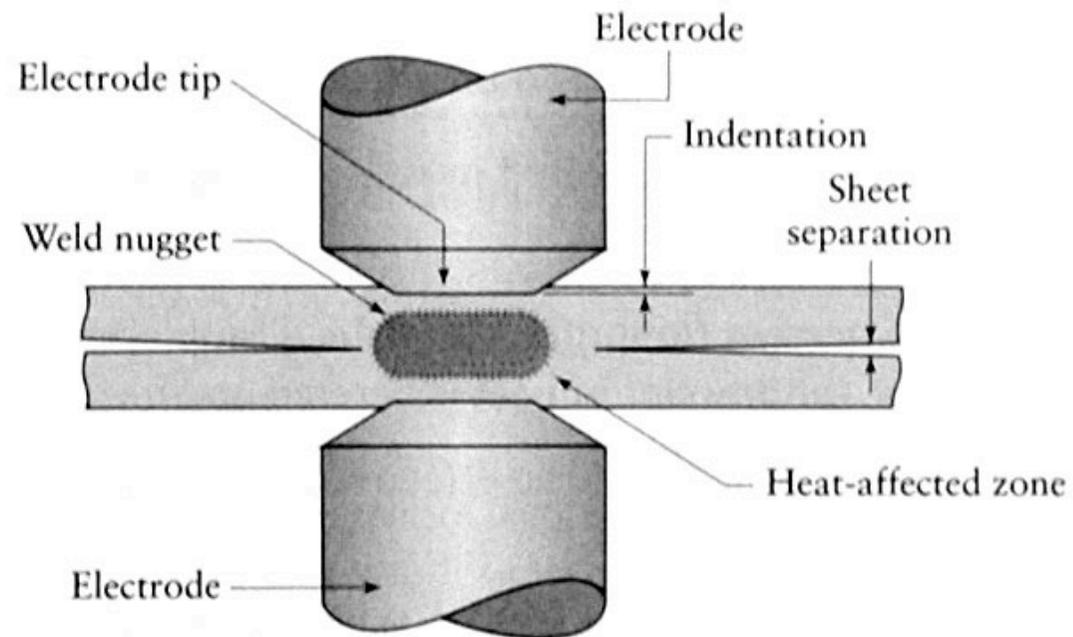
Saldatura a resistenza elettrica, RW

- Resistance Welding (RW): il calore per a giunzione viene generato per resistenza elettrica attraverso i due pezzi da saldare. Non ci sono elettrodi consumabili. Il calore generato (in joule o watt·sec) è dato da: $H=I^2Rt$, dove I è la corrente in ampere, R la resistenza in ohm e t il tempo in secondi. In realtà l'intera formula andrebbe moltiplicata per un fattore $K < 1$ che considera la perdita di calore per radiazione.
- La resistenza totale è data da: resistenza elettrodi + contatti elettrodi-pezzi + resistenza parti da saldare + resistenza contatto tra pezzi.
- Si usano elettrodi a bassa resistenza in materiale alto-fondente, tipo rame, per evitare la saldatura di quest'ultimi. Correnti fino a 100000 A, bassi voltaggi: 0.5-10 V.

Resistance Welding



(a)

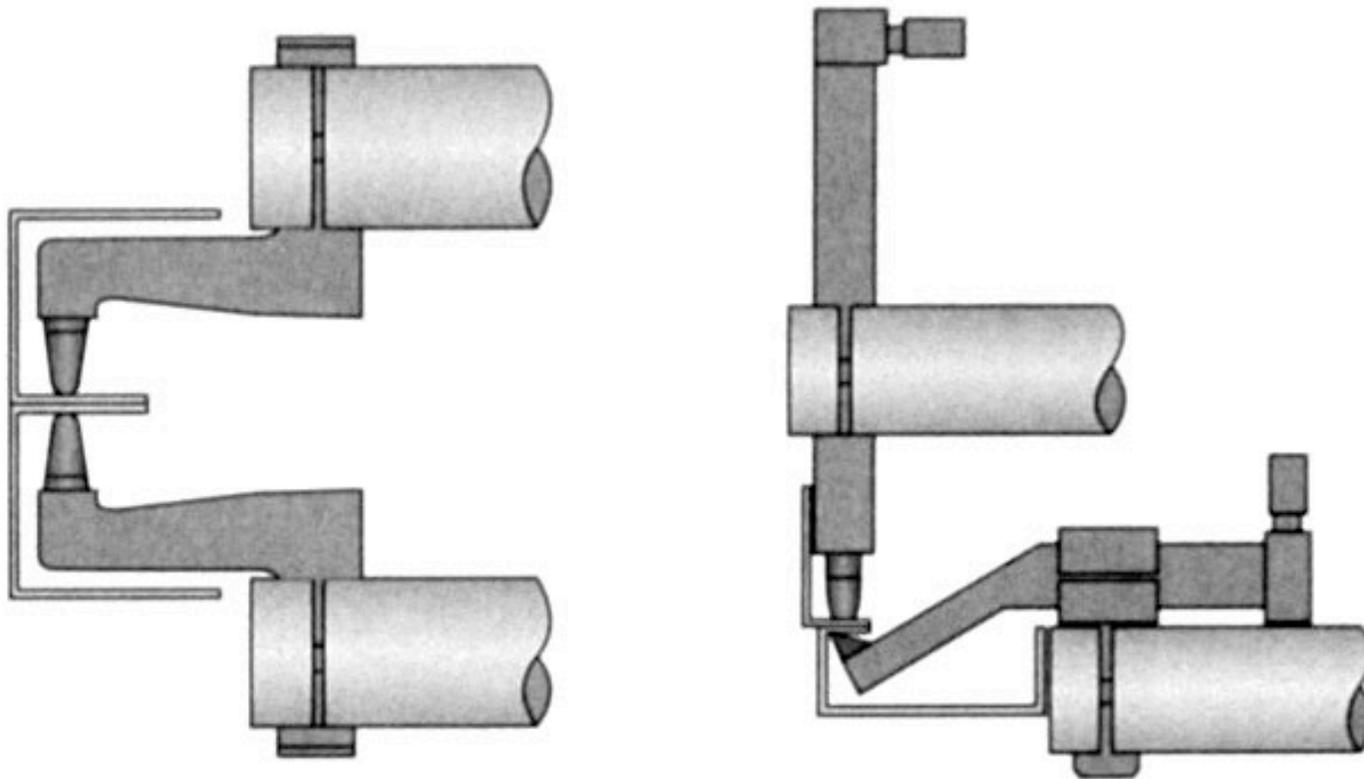


Resistance spot welding

- L'ultima figura della slide precedente riporta un esempio di saldatura a resistenza a spot. Per ottenere una buona saldatura la pressione deve essere applicata in continuo per tutto il tempo del passaggio di corrente.
- Lo spot welding viene utilizzato molto in sistemi automatizzati e robotizzati, il tempo di applicazione della corrente deve essere molto preciso per una buona saldatura.
- In una automobile possiamo trovare fino a 10000 punti di saldatura tramite questo metodo.
- La resistenza della saldatura dipende molto dalla rugosità delle due superfici e dalla loro pulizia.

Resistance spot welding

- In alcuni casi gli elettrodi vengono progettati per accedere a parti difficilmente raggiungibili:

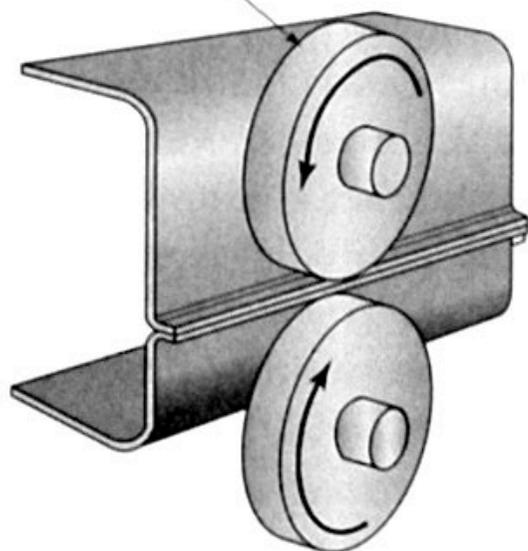


Resistance seam welding, RSEW

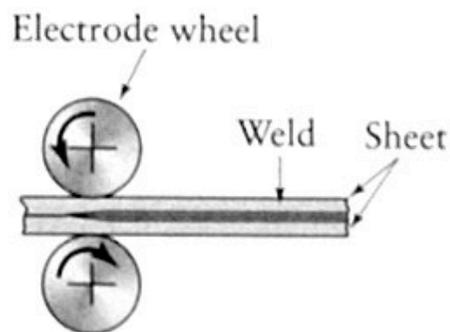
- Rispetto alla saldatura a spot, si usano delle ruote o cilindri rotanti che passano in continuo sulle superfici da saldare (a). In (b) abbiamo un'applicazione continua del carico elettrico con saldatura continua. In (b) (roll spot welding) la corrente è applicata a intervalli regolari.

Nella variante HRFW (High Frequency resistance welding) o HFIW (Induzione) vengono saldati tubi longitudinalmente.

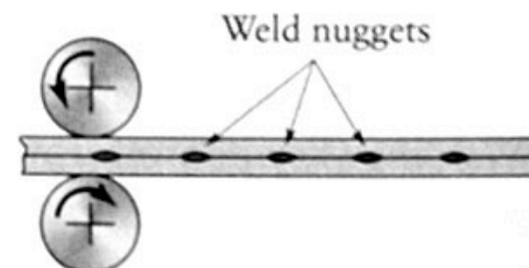
Electrode wheels



(a)



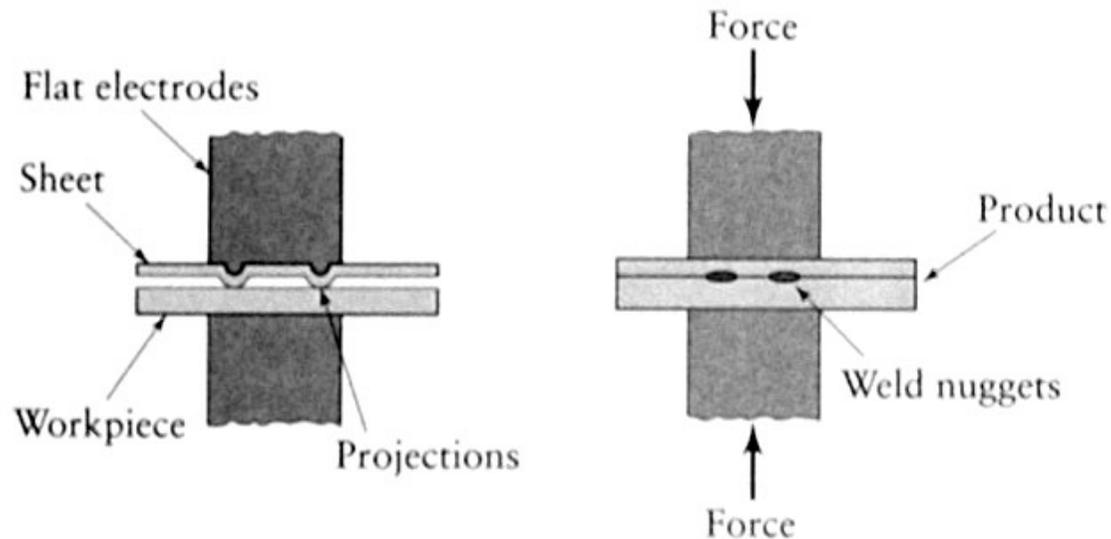
(b)



(c)

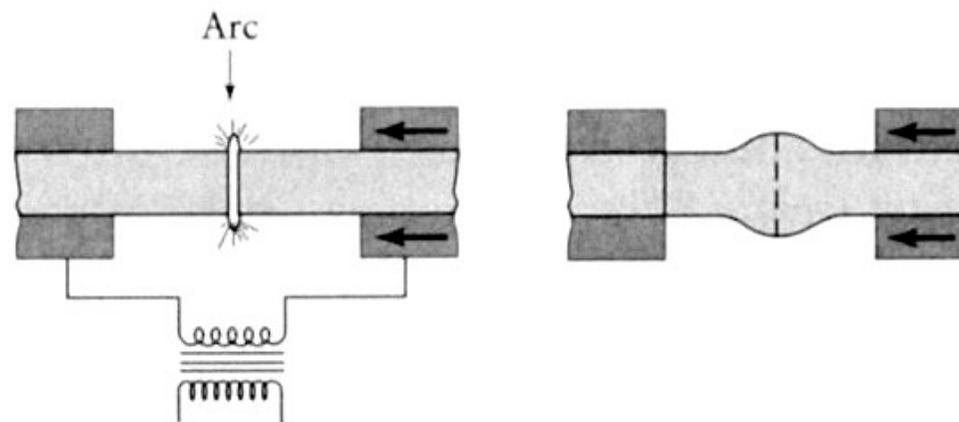
Resistance Projection Welding, RPW

- Si creano alcune protuberanze (proiezioni) per avere contatto elettrico solo in alcune zone dove avverrà poi la saldatura. Tali proiezioni possono essere circolari o ovali a seconda della resistenza richiesta. Gli elettrodi in rame vengono raffreddati ad acqua. Con questo metodo si producono più punti di saldatura in un solo colpo. Si usa infatti anche per griglie e carrelli della spesa.



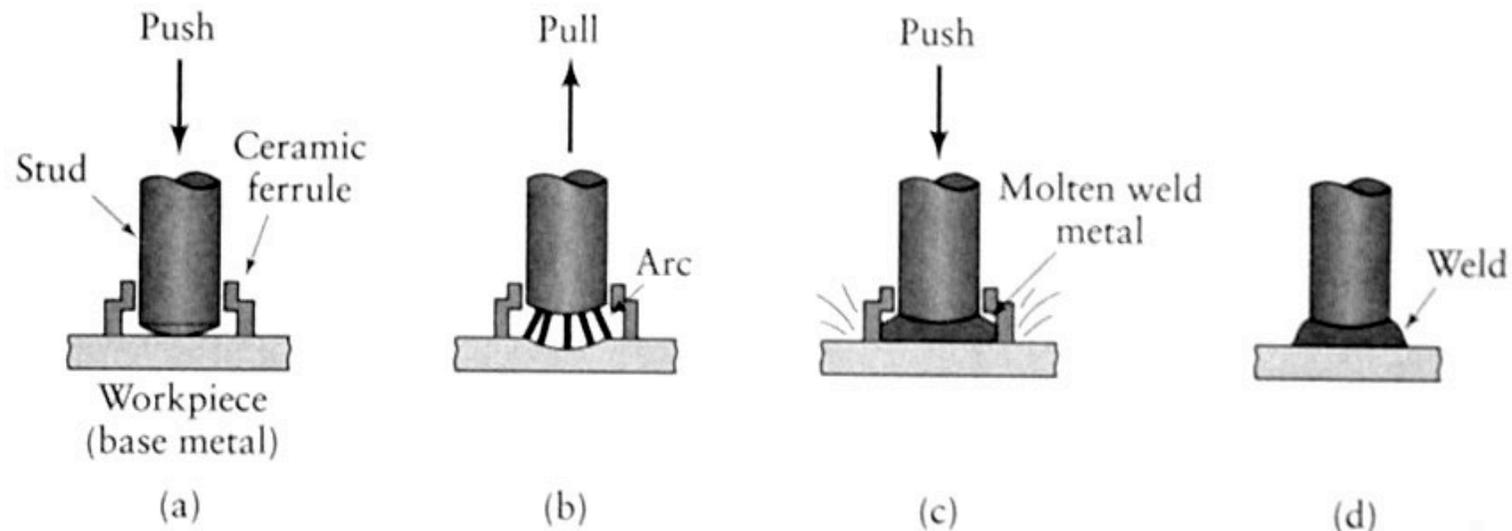
Flash Welding, FW

- Si fa scoccare un arco voltaico tra i due pezzi da unire, infatti il processo può venir classificato anche tra le saldature ad arco voltaico. Subito dopo l'arco, quando le estremità sono molto calde i due pezzi vengono messi a contatto in pressione per la giunzione. La qualità è molto buona in quanto l'arco scoccato elimina tutte le impurità e la sporcizia dalle superfici da saldare.



Stud arc welding, SW

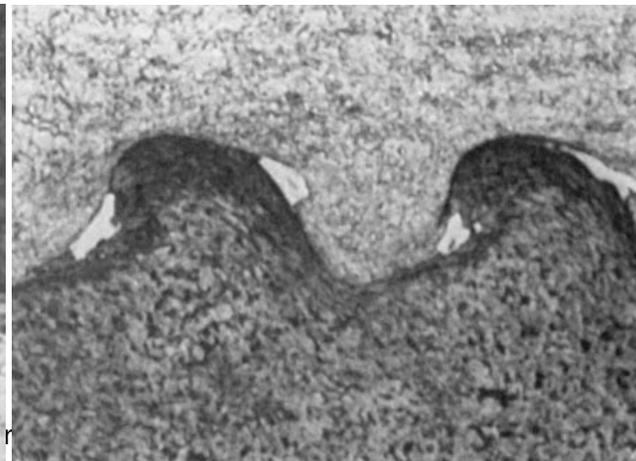
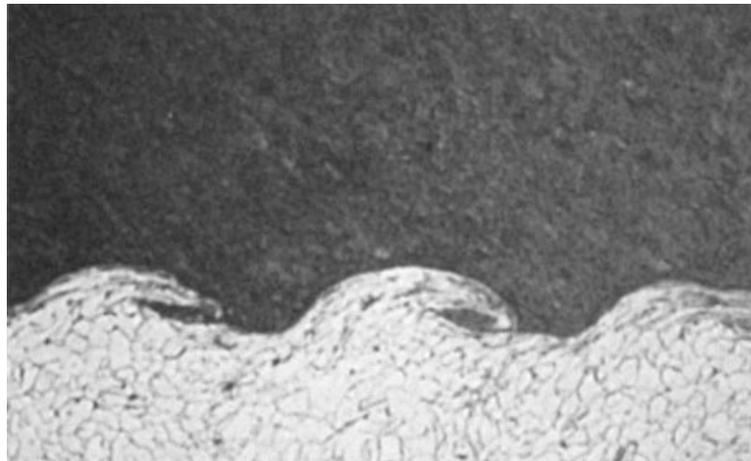
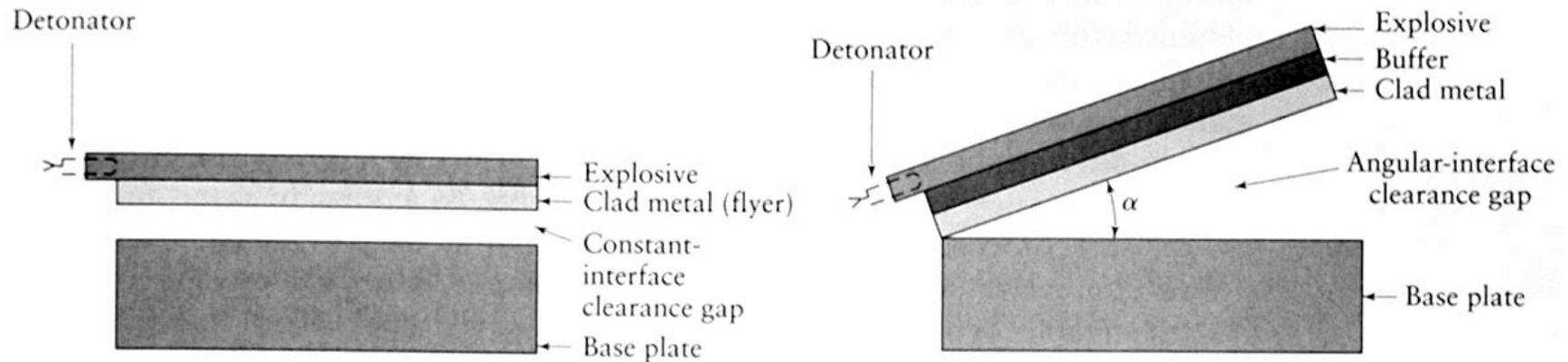
- Processo simile al Flash welding serve per saldare un perno o delle barre ad una lamiera o simili. Per prevenire ossidazioni e proteggere la parte di fuso che si genera con l'arco, si protegge con un anello ceramico la zona della saldatura:



-
- Percussion welding (PEW): si usa un condensatore per accumulare la carica ed avere una scarica in un tempo breve.

Explosion welding, EXW

- Si sfrutta l'impatto ad alta energia/velocità di uno dei due pezzi accelerato tramite esplosione. L'impatto causa un'adesione meccanica e per deformazione plastica



Diffusion bonding, DFW

- Nel diffusion bonding abbiamo una giunzione allo stato solido per diffusione all'interfaccia tra i due pezzi a temperatura elevata (0.5 T di fusione).
- In genere si usa tra due metalli che siano miscibili tra loro per avere un gradiente che faccia da driving force per la diffusione.
- Il processo è abbastanza lento poichè si basa sulla diffusione.
- Questo sistema di giunzione viene utilizzato nel sistema diffusion bonding/superplastic forming per la formatura e giunzione contemporanea di pezzi dalle forme complicate in un processo che rientra tra i near-net shape.

Diffusion bonding/superplastic forming

