

## 2. FONDAMENTI DELLA TECNOLOGIA

### 2.1 Principio del processo

La saldatura a resistenza a pressione si fonda sulla produzione di una giunzione intima, per effetto dell'energia termica e meccanica.

L'energia termica viene immediatamente prodotta dall'energia elettrica. La corrente di saldatura fluisce direttamente attraverso la zona di saldatura e vi produce calore per effetto della resistenza elettrica.

Lo sviluppo di calore è regolato dalla legge di Joule

**legge di Joule**  $Q = I^2 \cdot R \cdot t$  [Ws; J]

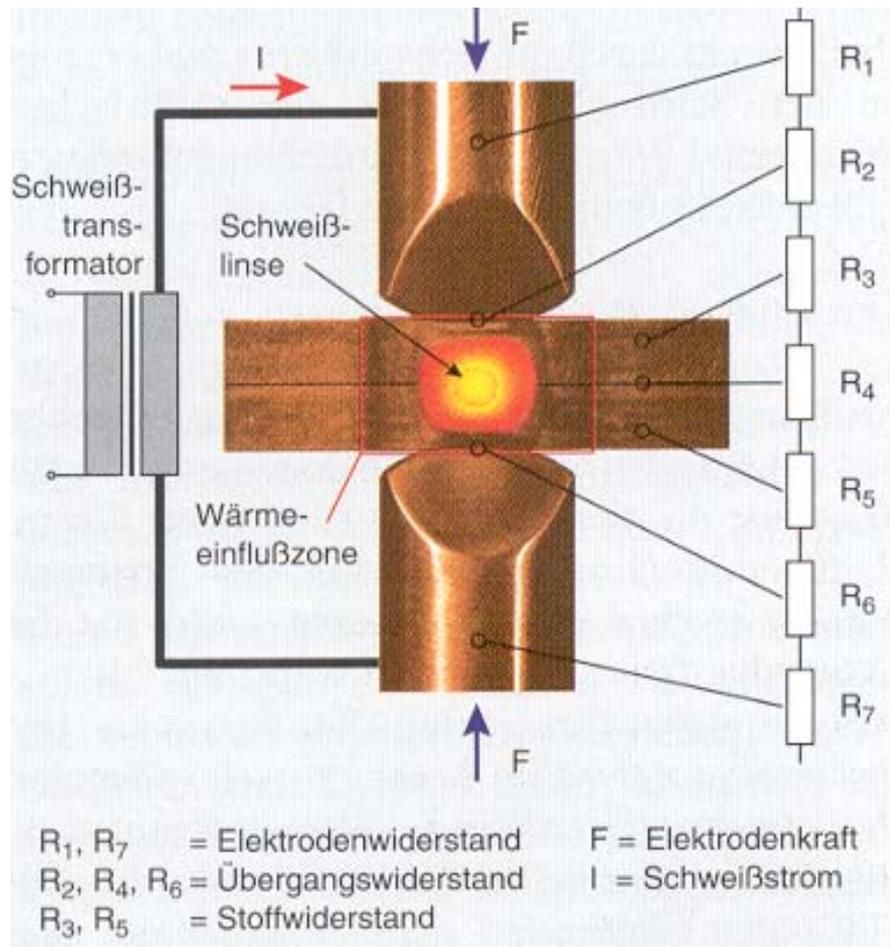
In questa relazione  $Q$  è il calore prodotto tra gli elettrodi,  $I$  la corrente che fluisce nella zona di saldatura,  $R$  la resistenza totale dei particolari tra gli elettrodi e  $t$  la durata totale del flusso della corrente di saldatura (tempo di corrente).

Impostando correttamente i parametri si forma tra i due particolari da saldare una zona di materiale fluido, la *lente di saldatura*. I pezzi sono pressati e mantenuti uno contro l'altro dagli elettrodi. La forza di saldatura diventa così un'ulteriore importante parametro del processo di saldatura a resistenza. L'intima giunzione si verifica dopo il decorso del tempo di saldatura nella zona della lente di saldatura, raffreddatasi soprattutto grazie al deflusso attraverso gli elettrodi del calore generato.

**Equilibrio termico** - Premessa all'ottenimento di una buona giunzione saldata è che, non soltanto l'adduzione di calore, ma anche la sua asportazione, siano costanti. In altre parole, poiché la dimensione della lente di saldatura dipende dal bilancio termico nel punto di saldatura, l'apporto di calore deve essere stabilizzato. La resistenza di contatto tra i particolari ha un influsso decisivo sulla produzione di calore.

**Resistenza totale** - La resistenza totale nel circuito della corrente di saldatura è la somma di diverse resistenze singole (vedi fig. 4). Si tratta in particolare delle resistenze dei materiali degli elettrodi di saldatura ( $R_1$  ed  $R_7$ , dipendenti dalla loro composizione chimica e dalla temperatura), delle resistenze dei materiali dei pezzi da saldare ( $R_3$  ed  $R_5$ , anch'esse dipendenti dalla composizione e dalla temperatura) e della resistenza totale al passaggio della corrente. Quest'ultima è costituita dalla somma delle  $R_2$  (resistenza al passaggio di corrente tra elettrodo superiore e pezzo superiore),  $R_4$  (resistenza al passaggio di corrente tra i due pezzi) ed  $R_6$  (resistenza al passaggio di corrente tra pezzo inferiore ed elettrodo inferiore).

Fig. 4  
 Schema della  
 catena delle  
 resistenze in  
 serie nel  
 circuito  
 secondario.



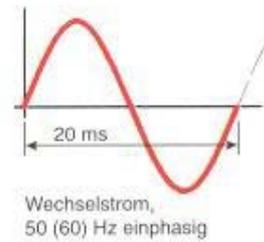
Queste tre resistenze al passaggio di corrente (denominate anche resistenze di contatto – *n. d. t.*) variano in relazione alla temperatura e alla forza degli elettrodi. All'aumentare di queste due grandezze durante il processo di saldatura e al conseguente ingrandirsi delle superfici di contatto per effetto dello spianamento delle punte di rugosità del materiale, corrisponde una diminuzione dei valori delle 3 resistenze di passaggio.

## 2.2 Tipi di corrente

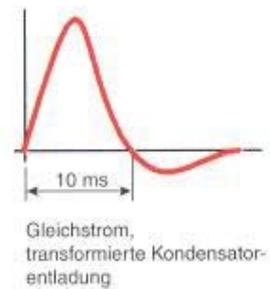
Per definizione è possibile dapprima discriminare tra corrente alternata e corrente continua. Quando nell'ambito della saldatura a resistenza si parla di "tipo di corrente" ci si vuole inizialmente riferire a quelle forme d'onda della corrente di saldatura con le quali in definitiva viene pilotato il processo; la scelta dell'una o dell'altra, ciascuna con il suo particolare andamento, è legata alla specifica natura della giunzione da realizzare.

Il flusso della corrente attraverso il punto di saldatura è tra i più importanti e meglio governabili parametri della saldatura a resistenza. Sia in caso di corrente alternata, sia di continua, è possibile ottimizzare con appropriate misure le correnti di saldatura nel circuito secondario del trasformatore e in questo modo adattare alle caratteristiche specifiche del giunto da realizzare. I tipi di corrente di saldatura utilizzabili e le loro particolari curve sono rappresentate nella figura 5 (vedi anche i capitoli *trasformatori e stadi di potenza* e *Stadi di comando*). In dettaglio esse sono:

- Corrente alternata alla frequenza di rete (50 o 60 Hz)



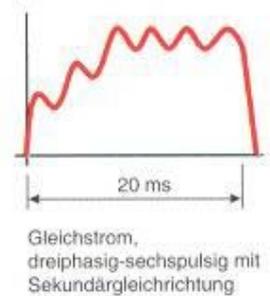
- Corrente continua, scarica di condensatori



- Corrente continua con regolazione a transistori



- Corrente continua con raddrizzamento a secondario(trifase a 6 impulsi)



- Corrente continua a media frequenza (da 1.000 a 25.000 Hz)

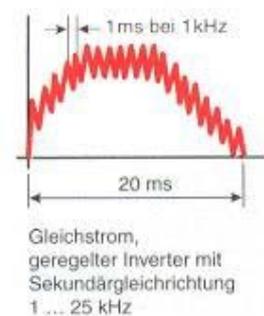


Fig. 5

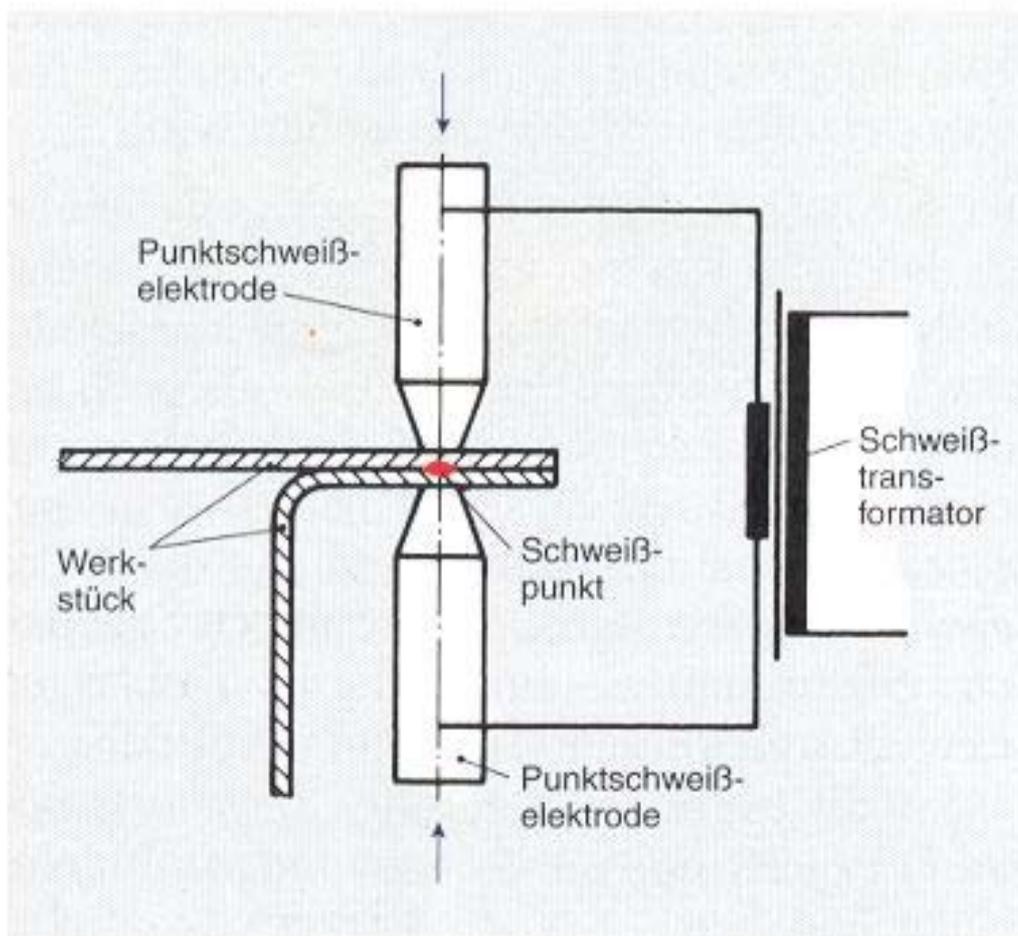
Forme d'onda caratteristiche della corrente secondaria di una saldatrice a resistenza

## 2.3 Varianti del processo

La saldatura a resistenza a pressione viene suddivisa in alcune varianti fondamentali. Le più importanti sono la saldatura a punti, la saldatura a proiezione, la saldatura a rulli, la saldatura di testa e la saldatura ad elettrodi paralleli (parallel gap).

### Saldatura a punto

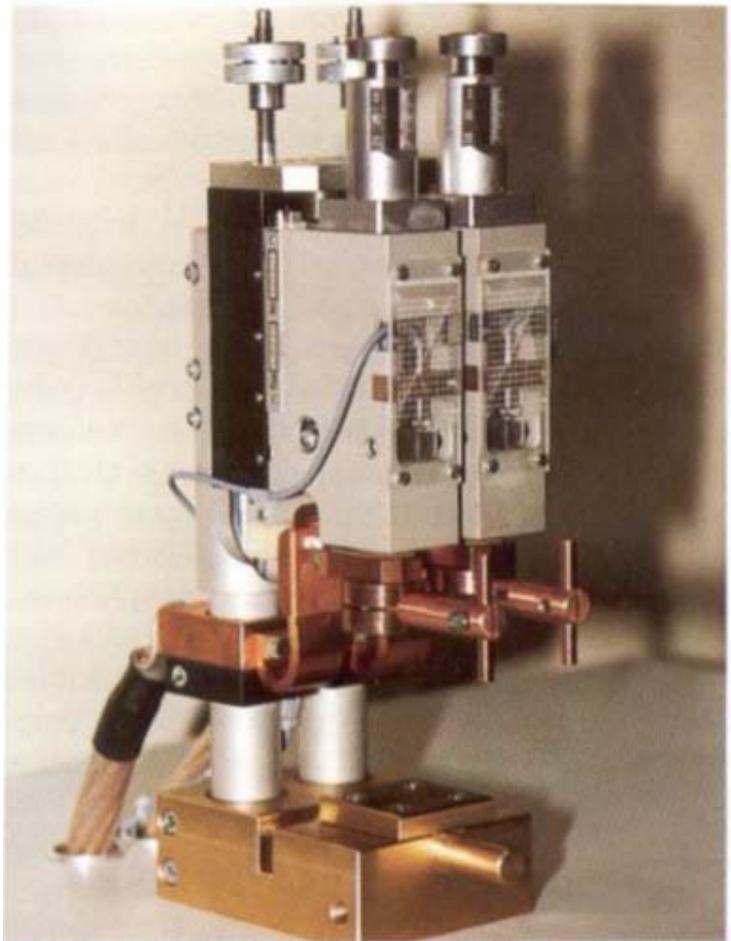
Nella saldatura a resistenza a punto i singoli particolari in forma di lamiere, profili, nastri, pezzi tranciati, fili o trecce vengono disposti tra elettrodi relativamente appuntiti (vedi fig.6).



*Fig.6: Saldatura a resistenza per punti*

La grandezza della zona saldata, ossia la dimensione della lente di saldatura, dipende dallo spessore dei particolari e dalla superficie di contatto degli elettrodi. Per evitare un' indesiderata deformazione della superficie esterna dei particolari in lavorazione l'elettrodo deve avere una superficie di contatto grande quanto possibile (compatibilmente con le necessità del processo). Molto spesso vengono impiegate teste multiple, come quella rappresentata in fig. 7.

Fig. 7:  
teste gemelle per saldatura a  
punto di elettrodi per lampade.



### Saldatura a proiezione

Nella saldatura a proiezione (fig. 8) la corrente di saldatura non viene concentrata con l'ausilio di elettrodi appuntiti, ma tramite una proiezione (bugna) o un profilo, ricavati su uno dei particolari nel punto di giunzione. E' perciò possibile lavorare con elettrodi piani ad elevata superficie, le cui forme sono adattate con esattezza al profilo del particolare in lavorazione.

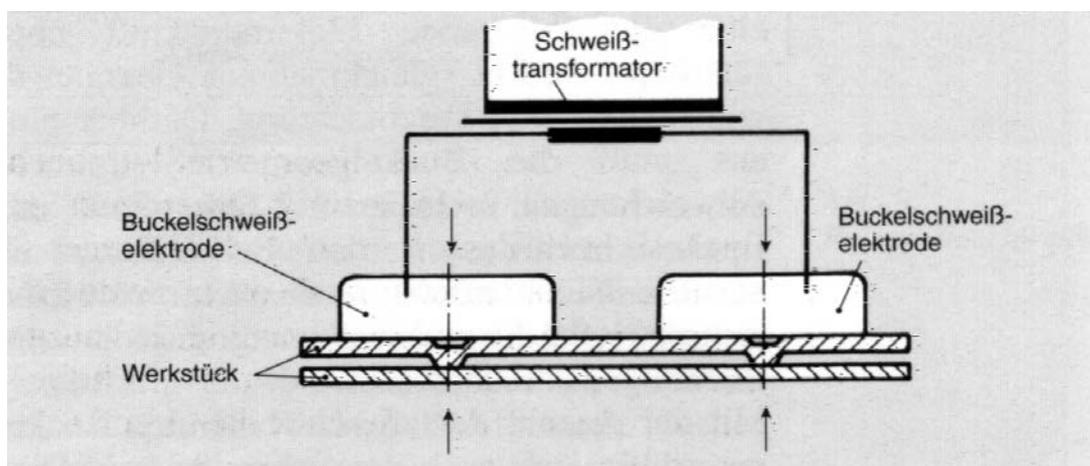


Fig. 8: saldatura a proiezione

**Produzione in grande serie** - Con ciò si ha un sensibile aumento del tempo di permanenza dell'elettrodo in macchina, evitando inoltre deformazioni e colorazioni delle superfici esterne del pezzo. I vantaggi della saldatura a proiezione sono perciò particolarmente significativi nella produzione in grande serie.

La proiezione può essere presente “naturalmente” sul pezzo a causa della sua forma (fili, profili ecc.), oppure ricavata tramite un processo aggiuntivo di lavorazione. Può trattarsi di una bugna tonda (a calotta sferica), allungata oppure ad anello. E' possibile altresì saldare in un unico ciclo di saldatura diverse bugne contemporaneamente sullo stesso pezzo.

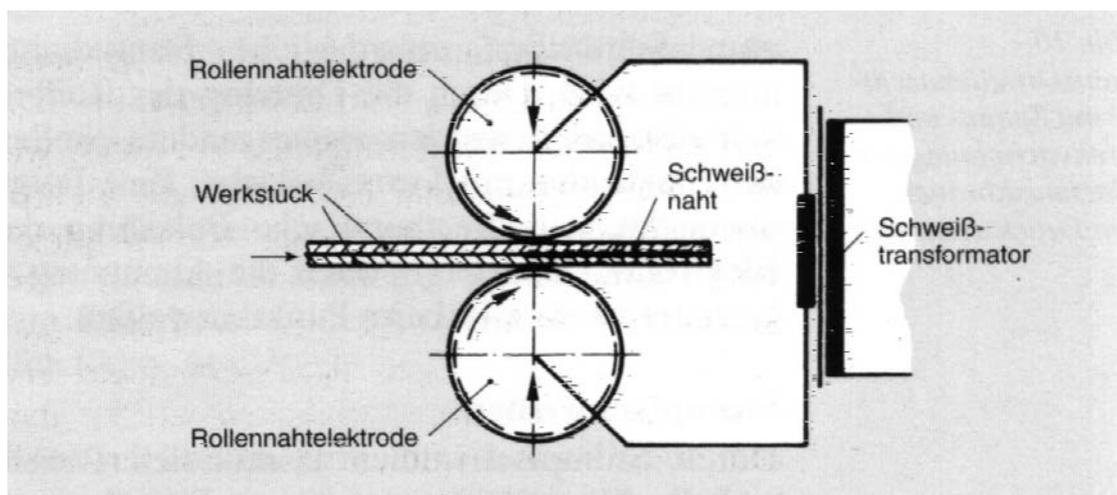
**Saldatura a proiezioni multiple** - E anche proprio in questo sta il suo elevato potenziale d'impiego: la saldatura a proiezione viene prevalentemente impiegata nella saldatura multipla. In questo caso viene usato un numero di elettrodi corrispondente oppure una coppia di elettrodi di grande superficie, connessi a una sorgente di corrente comune.

La densità di corrente necessaria per la saldatura viene raggiunta attraverso la sezione della bugna e non tramite il restringimento del percorso di passaggio della corrente, come nel caso della saldatura a punto. Solo quando però le resistenze elettriche di tutte le proiezioni sono uguali può essere raggiunta una costante qualità delle giunzioni saldate. La premessa a questo è che i pezzi siano in contatto su un piano e che la pressione su ciascuna proiezione sia uguale (ciò che permette di ottenere una uguale resistenza di passaggio alla corrente). Inoltre anche la geometria della proiezione deve essere corretta. Scostamenti dai valori nominali dell'altezza o della sezione della proiezione influenzano negativamente il risultato della saldatura. Non ultimo in ordine di importanza è un eguale flusso di corrente di saldatura attraverso ciascuna delle proiezioni. La corrente totale di saldatura aumenta all'aumentare del numero di proiezioni. Ciò comporta un corrispondente aumento della potenza di allacciamento, naturalmente con un indesiderato innalzamento del carico sulla rete.

**Raddrizzamento al secondario/Inverter/Scarica capacitiva** - D'aiuto in questi frangenti è l'impiego di saldatrici a corrente continua, che hanno un allacciamento trifase. Oltre a macchine trifasi è utile impiegare per questo tipo di giunzioni sorgenti a scarica di condensatore: esse, caratterizzate da un'elevata tensione secondaria, proprio per questo permettono una più omogenea ripartizione della corrente di saldatura attraverso tutte le bugne.

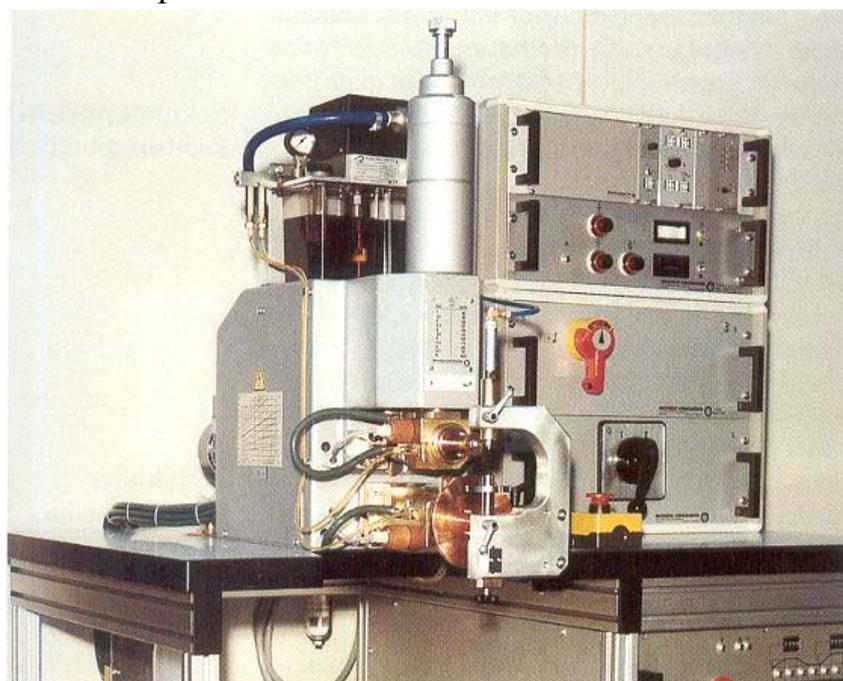
### **Saldatura a rulli**

Com'è possibile intuire già dal nome la corrente di saldatura e la forza vengono trasferite ai pezzi (nastri, lamiere, fili, profili, corpi cavi ecc. – vedi figg. 9 e 10) tramite rulli rotanti o comunque tramite elettrodi a forma di disco.



*Fig. 9. Saldatura a rulli*

**Corrente di saldatura temporizzata** - La corrente di saldatura viene temporizzata a impulsi in sequenza. Secondo il rapporto tra la durata di ciascun impulso e la velocità di avanzamento possono essere prodotte serie di saldature a punto o cuciture ermetiche. L'avanzamento può essere ottenuto tramite lo spostamento del pezzo o della testa. La dimensione della zona saldata dipende dallo spessore dei pezzi e dalla superficie di contatto dell'elettrodo. Utilizzando rulli paralleli è possibile altresì produrre contemporaneamente 2 cuciture parallele. La coppia di rulli tocca i pezzi su una piccola superficie in modo tale che il passaggio di corrente in questo punto consenta di raggiungere la densità di corrente necessaria per la saldatura. Poiché i rulli ruotano sono sollecitate dal passaggio di corrente parti sempre diverse della superficie di contatto. Una conseguenza di questo è che la sollecitazione termica dell'elettrodo – e quindi la sua usura – è inferiore a quella, per esempio della saldatura a punto.

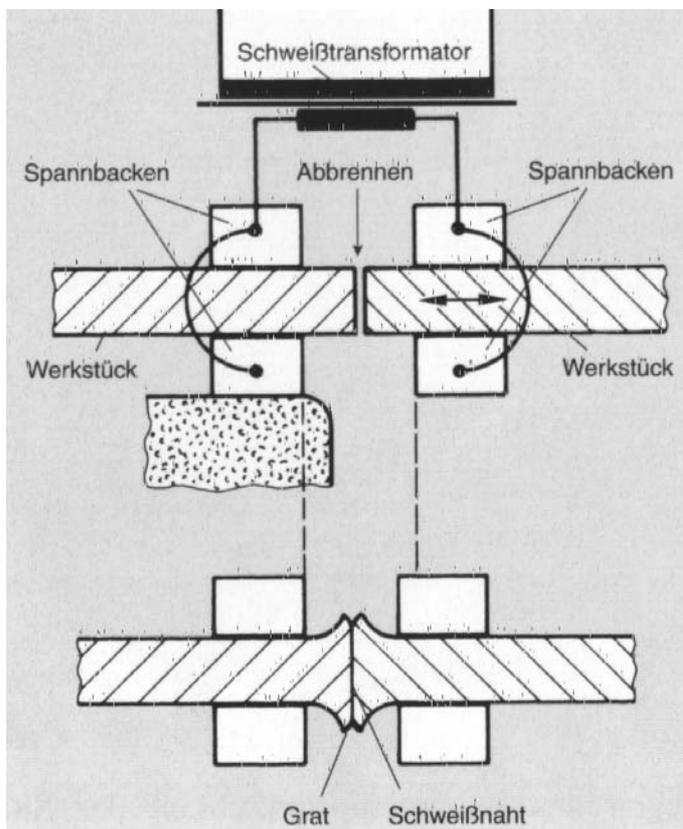


*Fig. 10: Saldatrice a rulli con dispositivo di posaggio, bloccaggio e rotazione di membrane piane in acciaio inox per sensori di pressione*

## Saldatura di testa

Con la saldatura di testa è possibile saldare fili o profili sulla loro sezione trasversale, gli uni agli altri oppure ad altri particolari.

**Elettrodi a ganascia** - Nella saldatura di testa i pezzi vengono pressati uno contro l'altro tramite elettrodi a ganascia e la zona di saldatura viene riscaldata per effetto del passaggio di corrente fino al raggiungimento della temperatura necessaria alla saldatura. Nello stesso tempo viene applicata una pressione di saldatura costante oppure variabile secondo un programma. Per questo è possibile impiegare normali saldatrici, cui si applicano elettrodi a ganascia, oppure saldatrici speciali semiautomatiche o automatiche dedicate. La dimensione della zona di saldatura dipende dalla grandezza della superficie di contatto. La formazione di bave e di un cordone in rilievo attorno alla zona saldata è spesso inevitabile. (vedi fig. 11).



*Fig.11:*

*Schematizzazione di una saldatura di testa.*

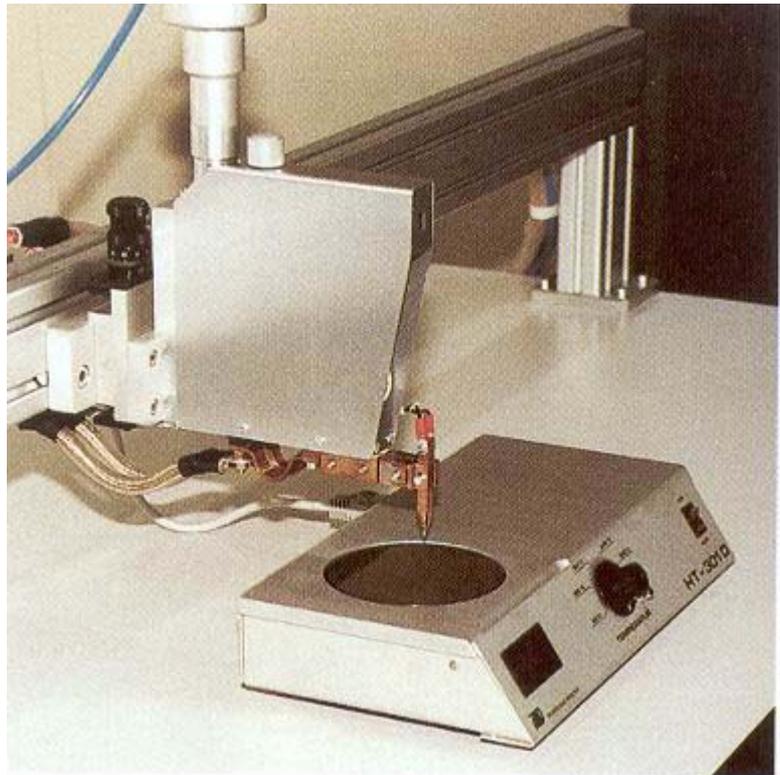
*E' rappresentato anche il risultato: senza riduzione della superficie di contatto è inevitabile il formarsi di un cordone di diametro > di quello di partenza.*

## Saldatura ad elettrodi paralleli

La saldatura ad elettrodi paralleli è una variante della saldatura a punti nella quale gli elettrodi, disposti parallelamente ed a breve distanza, si appoggiano entrambi sullo stesso lato del pezzo. In questo modo è possibile fissare fili o bandelle su film metallici isolati da un lato. La dimensione della zona saldata è determinata tra l'altro dallo spessore del materiale e dalla distanza tra le punte degli elettrodi

**Saldatura da un solo lato** - A causa della sensibilità al calore dei substrati e della impossibilità degli strati metallici di sopportare forti correnti è necessario lavorare con valori di corrente e di pressione di saldatura assai bassi e con impulsi di corrente molto brevi. In figura 12 è visibile una saldatrice a resistenza ad elettrodi paralleli.

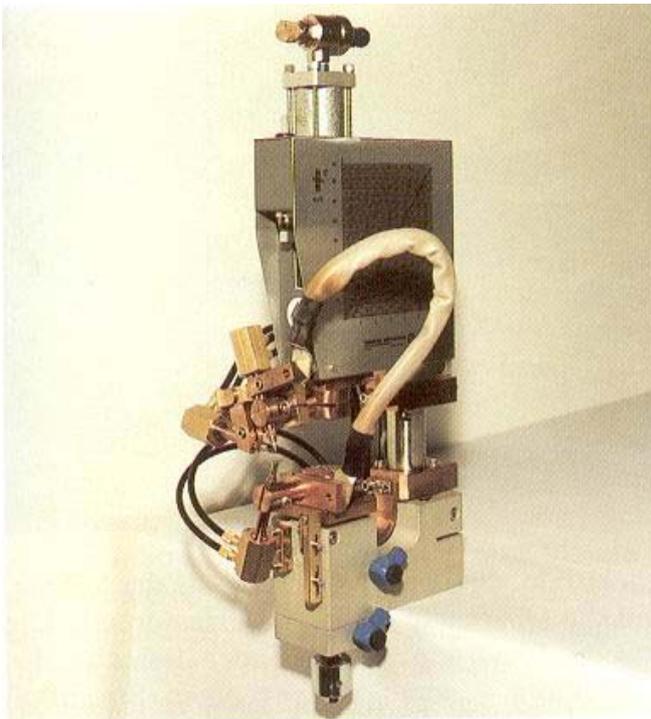
*Fig. 12:  
Testa di saldatura “parallel  
gap” montata su portale con  
piastra riscaldante per il  
substrato.*



### **Saldatura di fili isolati**

Un'altra variante di processo della saldatura a resistenza, anch'essa costituente un ambito a sé, è la saldatura di fili isolati. Solitamente si tratta di saldare fili, normalmente di rame, ricoperti di smalti isolanti.

**Sistema di saldatura a tre elettrodi** - Normalmente vengono per questo impiegati tre elettrodi (vedi fig. 13).



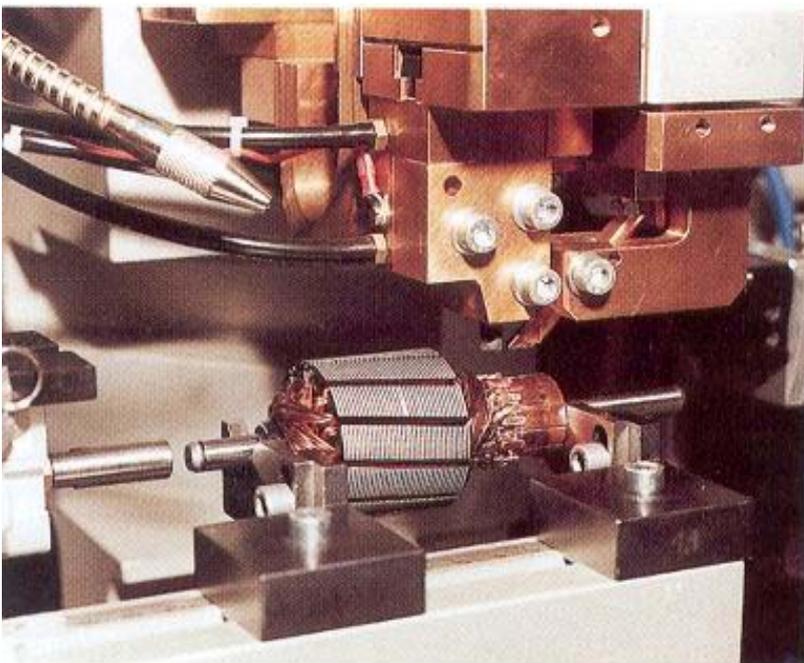
*Fig. 13:  
Testa di saldatura a punto con  
elettrodo inferiore mobile tramite  
cilindro e con sistema a tre  
elettrodi per la saldatura a  
resistenza di fili isolati.  
Un primo impulso che fluisce  
attraverso i due elettrodi superiori  
asporta lo strato isolante; il  
secondo impulso, tra l'elettrodo  
superiore di saldatura e quello  
inferiore realizza la saldatura del  
filo da cui è stato così asportato  
l'isolamento.*

L'elettrodo superiore in contatto con il filo viene dapprima riscaldato per effetto del passaggio di corrente attraverso un secondo elettrodo, in contatto con il primo, in modo da fare evaporare lo smalto isolante. In questo modo la corrente è libera di fluire verso l'elettrodo inferiore ed è possibile saldare il filo. La saldatura di fili isolati in rame ad elementi metallici di connessione si incontra molto spesso in ambito elettrotecnico. Ne sono esempio bobine, bussole e circuiti stampati. Per la saldatura di fili isolati devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

- Lo smalto deve essere di tipo saldabile,
- Il diametro del filo isolato deve essere compreso tra 0,04 e 0,5 mm,
- I particolari di connessione devono essere possibilmente di leghe a base rame, meglio ancora se stagnato o argentato.

### **Ricalcatura a caldo a resistenza (Hot staking)**

**Ricalcatura a caldo** - Lo Hot staking (vedi fig. 14) consiste in un processo di ricalcatura a caldo che trova svariati impieghi nella produzione di collettori a gancio e fresati. Normalmente due fili di rame smaltato vengono inseriti accoppiati in una cava di un collettore mentre un elettrodo, che deve essere più largo della cava, preme gli angoli superiori della cava stessa. L'altro elettrodo si appoggia sulla lamella del collettore in modo tale che si crei un flusso di corrente ed il rame venga ricalcato a caldo. Eventuali piccoli danneggiamenti della superficie della lamella non sono critici poiché i particolari vengono successivamente torniti. Per il processo di ricalcatura a caldo devono essere impiegati elettrodi di metallo duro (tungsteno o molibdeno) che sono caratterizzati da una scarsa conducibilità elettrica e termica. Ciò significa che al passaggio della corrente si verifica un intenso riscaldamento che porta l'elettrodo all'incandescenza.



*Fig. 14:  
Saldatura a resistenza di fili isolati a collettori a gancio di motori elettrici. Dispositivi diversi attenuano o eliminano le conseguenze negative dell'accumulo di calore nell'elettrodo dovuto all'elevato numero di saldature realizzate in rapida sequenza.*