

## 4 CAMPO D'IMPIEGO DELLA SALDATURA A RESISTENZA

### 4.1 Materiali e saldabilità

La regola generale che vale in questo campo è che sono meglio saldabili quei materiali che hanno temperatura di fusione bassa e scarsa conducibilità termica ed elettrica. Questa è una prima valutazione grossolana ed esistono naturalmente una quantità di altri fattori che influenzano il processo, oltre le citate grandezze fisiche.

**Fattori d'influenza che dipendono dal materiale** - Scendendo nel dettaglio si può dire che la saldabilità è legata ai seguenti quattro fattori di influenza:

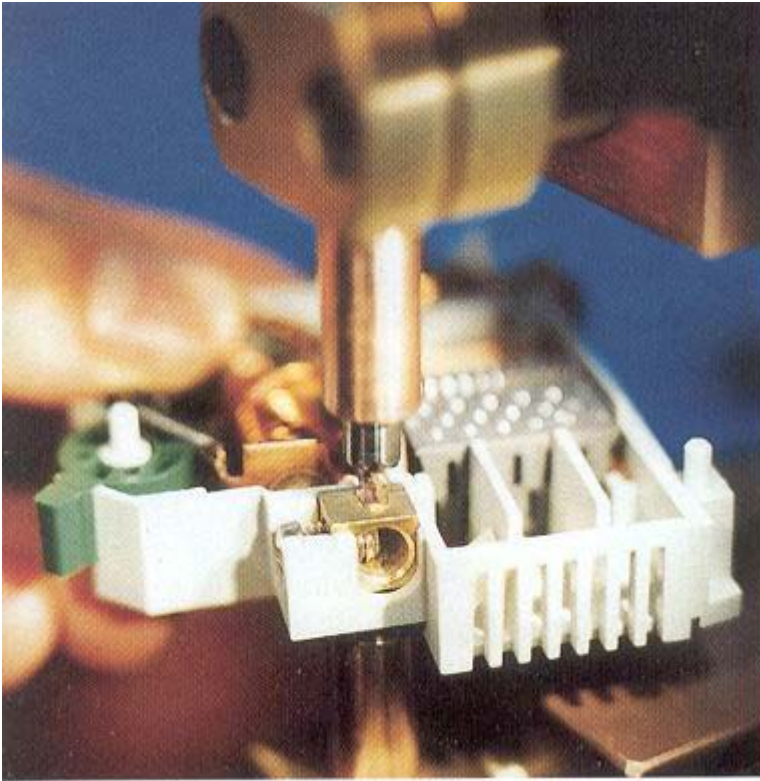
- *Caratteristiche geometriche:* dimensioni e masse relative, posizionamento reciproco, forma e dimensione e omogeneità delle proiezioni ecc., da ciò dipende molte volte la qualità, risolti i problemi relativi a materiali strati superficiali ecc.
- *Caratteristiche fisiche:* conducibilità elettrica specifica, conducibilità termica specifica, tenuta meccanica, tenacità, deformabilità, elasticità, durezza, resistenza al calore sono esempi delle più importanti grandezze che hanno effetto sul processo.
- *Composizione chimica:* dalla composizione chimica della lega dipende la sua tenuta meccanica, il rapporto di solidificazione e la temperatura di fusione.
- *Caratteristiche metallurgiche:* determinanti sono la dimensione del grano, la sua orientazione, e la formazione della struttura (tenera, laminata a freddo, invecchiata a freddo o a caldo, ricotta).
- *Caratteristiche superficiali:* rugosità, ondulosità, rivestimenti metallici, strati di ossido e non ultimo lo stato di pulizia della superficie (eventuale presenza di oli, grassi, sporco, residui organici di bagno ecc.) hanno un effetto determinante sulla saldabilità.

Al gran numero di diversi fattori di influenza sulla saldabilità si aggiunge il fatto che alcuni materiali o abbinamenti di materiali non sono saldabili, o perlomeno, non sono saldabili allo stesso modo nell'ambito di tutte le varianti al processo della saldatura a resistenza. Ciò si può riscontrare per esempio nel caso di alcune leghe di rame che sono saldabili a punto o a rulli (anche se limitatamente), ma non a proiezione.

**Saldabile ?** - L'ampliamento progressivo del concetto di saldabilità va di pari passo con lo sviluppo tecnologico. Con appropriate misure e grazie ai progressi fatti nella progettazione degli impianti per saldatura a resistenza è oggi possibile saldare in modo affidabile materiali che solo poco tempo fa non erano ritenuti saldabili e il campo di applicazione di questa particolare tecnologia è destinato ad ampliarsi anche in futuro.

Così il processo di saldatura a resistenza si presenta oggi in primo luogo come uno dei più completi a disposizione, soprattutto nel campo della saldatura a punto fine di piccoli particolari (vedi fig. 27). In linea di principio quasi ogni combinazione di metalli uguali o diversi è saldabile. Quasi sempre è raggiungibile una tenuta

meccanica che per lo scopo che ci si propone può essere considerata soddisfacente. Molte giunzioni metalliche, dapprima classificate come sconsigliabili, possono poi essere realizzate, magari attraverso opportuni accorgimenti o varianti di processo.



*Fig. 27:*

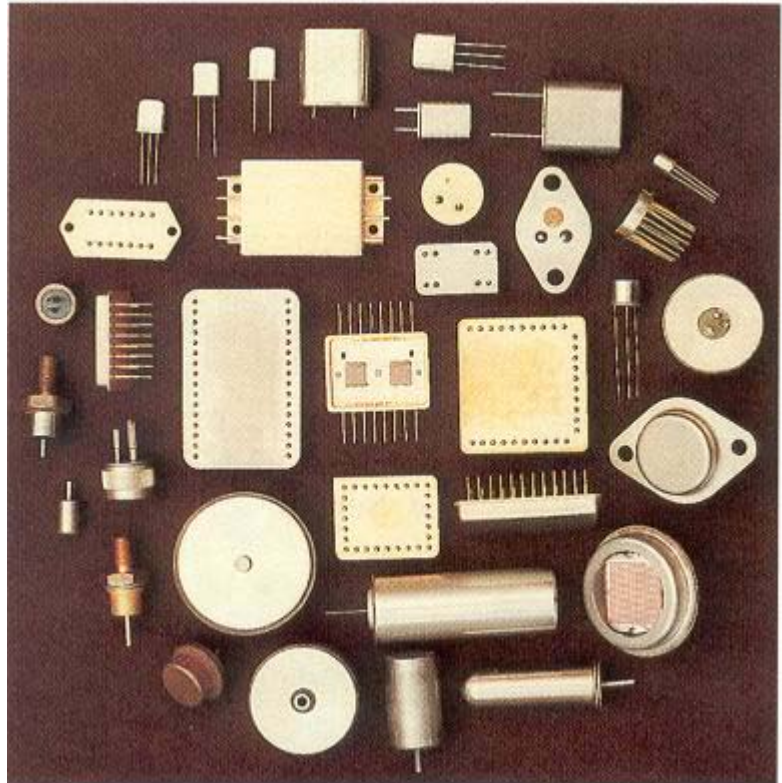
*Immagine che può essere considerata paradigmatica dei risultati oggi raggiunti nel campo della saldatura a resistenza dei metalli non ferrosi. Si tratta della saldatura di un conduttore in Cu nudo di diametro consistente (ca. 2 mm) a un morsetto forato in OT, anch'esso quindi di materiale buon conduttore, senza materiale d'apporto e dentro un contenitore plastico. Ciò dimostra l'ottima gestione dell'energia di saldatura da parte dell'impianto, dotato di sorgente a corrente continua.*

**Materiali speciali** - Soprattutto nella produzione di piccoli pezzi vengono normalmente utilizzati materiali, che per alcuni impieghi speciali debbono presentare caratteristiche “selezionate” (vedi fig. 28). Specifiche conducibilità elettriche e termiche, elasticità, tenute meccaniche, resistenze alla corrosione e alla distensione, proprio nella produzione di apparecchiature elettriche (spine, molle di contatto ecc.) sono di particolare significato – un campo nel quale la saldatura a resistenza è onnipresente.

*Fig. 28:*

*Custodie di metallo e ceramica per componenti del settore microelettronico.*

*L'incapsulamento ermetico tramite saldatura o brasatura a resistenza avviene in un impianto speciale con camera a vuoto oppure in atmosfera, talvolta con saldatrici "parallel gap".*



Inizialmente, nel caso di questi materiali speciali, la loro saldabilità spesso non è nota e necessita di essere verificata tramite prove di saldatura. Macchine adatte con specifici parametri sono perlopiù in grado di produrre una giunzione. Si può riscontrare che, proprio l'abbondanza di parametri e di grandezze di influenza costituisce la forza di questo processo. Perciò individuando con precisione e variando opportunamente queste grandezze è possibile coprire un ampio spettro di applicazioni.

**Materiali comuni & commerciali** - La saldabilità dei materiali commerciali più comuni è ormai stata verificata approfonditamente e riportata su diverse specifiche e norme DIN. La saldabilità delle più importanti classi di materiali si riassume come segue:

### **Acciai**

I materiali acciai sono di norma adatti alla saldatura a resistenza – come anche a tutti gli altri processi di saldatura. Acciai non legati e legati con un tenore di elementi di lega inferiore al 5% sono perciò adatti alla saldatura a resistenza a punti quando “senza particolari accorgimenti non si verifica un indurimento eccessivo o non si evidenziano cricche o altre irregolarità inaccettabili” (DIN 8254, parte seconda). Gli acciai secondo la DIN 1623, parte prima (St 12, St 13 ed St 14), così come gli acciai secondo la DIN 1624 (St 2, St 3 ed St 4) vengono definiti nel foglio informativo n° 2902, parte seconda della DVS (Deutscher Verlag für Schweißtechnik – Edizioni tedesche sulla tecnica della saldatura) come ben saldabili a punto. Contrariamente a ciò, gli acciai secondo la norma 1623, parte seconda, sono detti saldabili solo a certe condizioni.; il diffuso St 37 costituisce qui l'eccezione.

Gli acciai inossidabili al CrNi (DIN 17006) hanno un'elevata resistenza elettrica ed una minore conducibilità termica, se comparati con gli acciai non legati o debolmente legati. Per saldarli è perciò necessario impiegare una maggiore forza agli elettrodi ed una minore corrente. È qui consigliato un tempo di saldatura più breve possibile.

### **Acciai con rivestimenti metallici**

Attraverso il deposito di strati metallici diversi le caratteristiche di acciai non legati o debolmente legati possono essere sensibilmente migliorate. L'esempio più noto è la costruzione di carrozzerie nell'industria automobilistica sulle cui lamiere, al fine di aumentare la resistenza alla corrosione viene depositato uno strato di zinco. I rivestimenti metallici non sono di norma critici per la saldatura resistenza. Ne va però valutata la conducibilità elettrica, la durezza, la temperatura di fusione ecc., in rapporto a quelle del materiale di base. Inoltre anche il loro spessore e la loro uniformità influiscono sulla saldabilità. Essa è tanto maggiore quanto più sottile ed uniforme è il rivestimento.

**Rivestimenti metallici** - La saldatura a resistenza a pressione è possibile con quasi tutti gli strati superficiali. La bontà della saldatura dipende però dalle differenti caratteristiche fisiche di ciascuno strato. Poiché i metalli per i rivestimenti normalmente sono teneri (eccezion fatta per il cromo) ed hanno un punto di fusione più basso rispetto all'acciaio come materiale base, dopo il primo flusso della corrente la punta dell'elettrodo si imprime maggiormente nella superficie del pezzo di quanto non faccia nel caso dell'acciaio nudo, senza rivestimento. Perciò la superficie di contatto aumenta e corrispondentemente diminuisce la densità di corrente. Con un incremento della corrente di saldatura e/o un allungamento del tempo di corrente è però possibile una compensazione.

**Rivestimenti non metallici** - In caso di rivestimenti inorganici non metallici si presentano invece maggiori difficoltà. Questi strati sono perlopiù cattivi conduttori, quando non addirittura isolanti. In linea di principio la saldabilità di acciai rivestiti di questi strati è molto peggiore di quanto non sia quella che si ha con rivestimenti metallici, tuttavia la saldatura a resistenza è ancora possibile. Per l'avvio del processo di saldatura è in questo caso necessario che questi strati isolanti o scarsamente conduttori vengano localmente perforati grazie ad un appoggio relativamente violento dell'elettrodo. Perciò sono necessarie forze elevate prodotte dalla saldatrice stessa.

### **Alluminio e sue leghe**

La saldatura dell'alluminio è generalmente più complessa di quella dell'acciaio. Per la sua maggiore conducibilità elettrica e termica, l'alluminio si riscalda meno per effetto del passaggio di corrente dei materiali acciaiati.

**Elevate correnti di saldatura** - Per questo motivo è necessario un apporto di energia e perciò di corrente da 3 a 4 volte superiore. L'alluminio e le sue leghe sono saldabili a punto praticamente in ogni combinazione. E' necessaria però sempre un'accurata pulitura delle superfici tramite spazzolatura o decapaggio (vedi foglio informativo V3 della Aluminiumzentrale di Düsseldorf). Ossidi tendono a depositarsi rapidamente sull'elettrodo richiedendone una assai frequente pulitura. Inoltre la testa deve avere

un dinamica elevatissima a causa della tendenza dell'alluminio a cedere improvvisamente in fase di assestamento. La saldatura a proiezione di materiali a base alluminio, al contrario di quella a punto, presenta maggiori difficoltà e non è sufficientemente sicura. Il più delle volte la forza necessaria in questo caso non può essere correttamente applicata o la proiezione non può essere ricavata. Le leghe di alluminio sono adatte alla cucitura a rulli così come alla saldatura di testa, tradizionale e a scintillio.

### **Leghe a base rame e leghe a base nichel**

Proprio per la realizzazione di piccoli particolari, soprattutto nell'elettrotecnica, vengono impiegati materiali appartenenti a questi gruppi per pezzi di grande serie.

**Quasi nessun problema** - Se ancora fino a pochi anni fa i materiali a base rame erano indicati a causa delle loro caratteristiche fisiche (elevata conducibilità elettrica e termica) come solo limitatamente saldabili, oggi invece per la moderna tecnica di saldatura a resistenza essi non presentano quasi più problemi. Con correnti elevate, brevi tempi di saldatura ed elettrodi opportunamente formati, non è raro che la saldatura a resistenza a punto sia uno dei processi preferiti per la giunzione di queste leghe. Ciò vale ancor più per le leghe di nichel, le quali infatti, grazie alle loro caratteristiche fisiche e chimiche, sono ancor meglio saldabili.

### **Abbinamenti di materiali diversi**

Fondamentalmente vale il seguente principio: saldare un giunto a resistenza è tanto più difficile, quanto più i punti di fusione e la conducibilità dei materiali in gioco differiscono. La saldabilità a punto di una serie di materiali e di combinazioni di materiali è riassunta in appendice.

## **4.2 Parametri di processo**

Come si è mostrato nel capitolo precedente, il successo di un'applicazione industriale dipende, specialmente in caso di elevata meccanizzazione, da una molteplicità di parametri diversi e dalla loro interazione. Essi debbono essere individuati ed ottimizzati per la singola applicazione. Ciò richiede comunque l'esecuzione di prove di saldatura. Nella saldatura a resistenza il risultato viene in prima istanza influenzato dai seguenti parametri:

- Intensità della corrente di saldatura
- Tempo di saldatura
- Forma dell'impulso di corrente e tempo di mantenimento
- Tensione secondaria del trasformatore
- Forza agli elettrodi
- Forma e materiale degli elettrodi

La corretta impostazione delle citate grandezze di influenza deve essere trovata a seguito di una serie di prove, grazie alle quali però è possibile solo schematizzare il

procedimento e verificarne la fattibilità. Alcuni diversi fattori d'influenza (condizioni specifiche diverse, grandi serie, elevati ritmi di lavoro ecc.) rendono spesso necessaria un'ottimizzazione dei parametri all'avviamento in produzione.

**Andamento schematico di una prova di saldatura** - Si inizia dapprima con il tempo di saldatura più corto e la tensione secondaria più bassa, incrementando progressivamente l'intensità della corrente. Se con la massima tensione di saldatura non si ottiene ancora un risultato soddisfacente si aumenta allora la tensione secondaria. La prova si prosegue partendo ancora dalla corrente più bassa. In mancanza ancora di un risultato soddisfacente si aumentano di nuovo gradualmente la corrente e la tensione di saldatura, con un tempo di saldatura maggiorato.

La pressione degli elettrodi (forza di saldatura) sui pezzi dovrebbe sempre essere regolata in modo da evitare la generazione di spruzzi. Una volta ottenuta una giunzione soddisfacente si deve aumentare gradualmente la potenza elettrica fino al punto in cui la qualità della saldatura torna a diminuire, per poter individuare la migliore impostazione dei parametri di saldatura. Nel condurre queste ricerche deve essere ogni volta variato un solo parametro, in modo da poterne osservare l'influsso. Una documentazione puntuale di quanto fatto è in questo caso imprescindibile. Per la riduzione dei costi di queste prove di laboratorio possono essere usate anche nuove tecniche di prova statistiche (Metodo Taguchi). Nel caso dell'impiego delle moderne saldatrici con sorgente a corrente continua regolata non è possibile né necessario regolare direttamente la tensione secondaria. Sono invece a disposizione altre modalità di lavoro che vanno sperimentate singolarmente: la modalità a corrente costante, a tensione costante e quella a potenza costante. In questo caso è ancora più importante la verifica in produzione su molti lotti poiché alcuni vantaggi essenziali dell'una o dell'altra modalità possano evidenziarsi dopo molte saldature.

**Considerazioni sui parametri più importanti** - Va notato brevemente quanto segue sui singoli parametri:

- *Tempo di saldatura:*

Il tempo di saldatura deve essere breve nelle saldature di materiali buoni conduttori di calore, un po' più lungo in caso contrario.

- *Tempo di mantenimento:*

La formazione della struttura nella lente di saldatura dipende dalla velocità di raffreddamento in combinazione con il tempo di saldatura. Più veloce è il raffreddamento, migliore è la struttura cristallina. L'asportazione del calore avviene in prima battuta attraverso gli elettrodi. Perciò può essere vantaggioso mantenerli chiusi qualche decimo di secondo dopo il decorso del tempo di saldatura.

- *Tensione secondaria:*

La potenza del processo di saldatura è tanto maggiore quanto più alta è la tensione. Nel caso di tensione secondaria eccessivamente elevata la densità di corrente aumenta a tal punto che le superfici dei pezzi e degli elettrodi possono bruciare. Si generano allora spruzzi, pori o microfusioni nel pezzo. In questo caso la tensione deve essere diminuita o deve essere aumentata la pressione di saldatura.



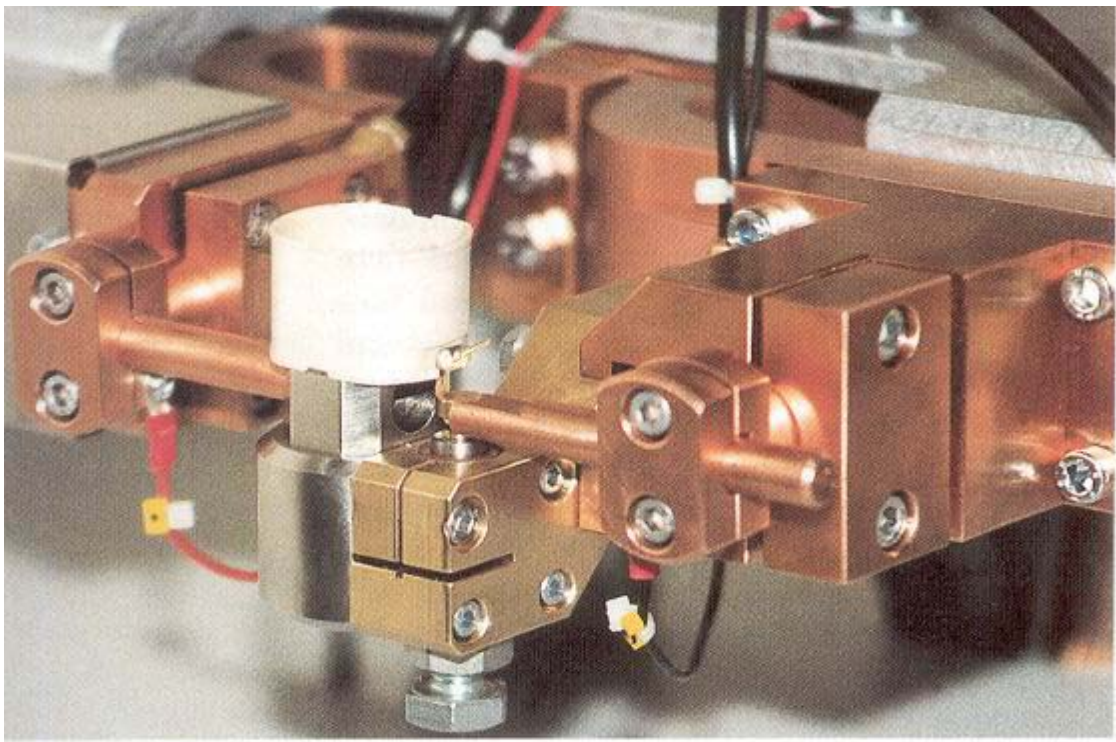
- *Forza di saldatura:*

L'entità della pressione degli elettrodi viene impostata in base al materiale dei particolari da saldare. In caso di materiali resistivi, come Ni, W, Mo o acciaio, deve essere impiegata una pressione maggiore per diminuire le resistenze di passaggio (dette anche resistenze di contatto - *n.d.t.*) nel punto di saldatura. Per i materiali con minore resistenza elettrica, come p. e. Cu, Ag o OT è al contrario vantaggiosa una pressione più bassa, per potere avere un rapido riscaldamento locale, in grazia della così ottenuta maggiore resistenza di contatto. La pressione non può però essere troppo bassa, poiché, con un contatto troppo debole dei pezzi nel punto di saldatura, può generarsi un arco. Una fuoriuscita di materiale fuso ne sarebbe la conseguenza.

- *Forma e materiale degli elettrodi:*

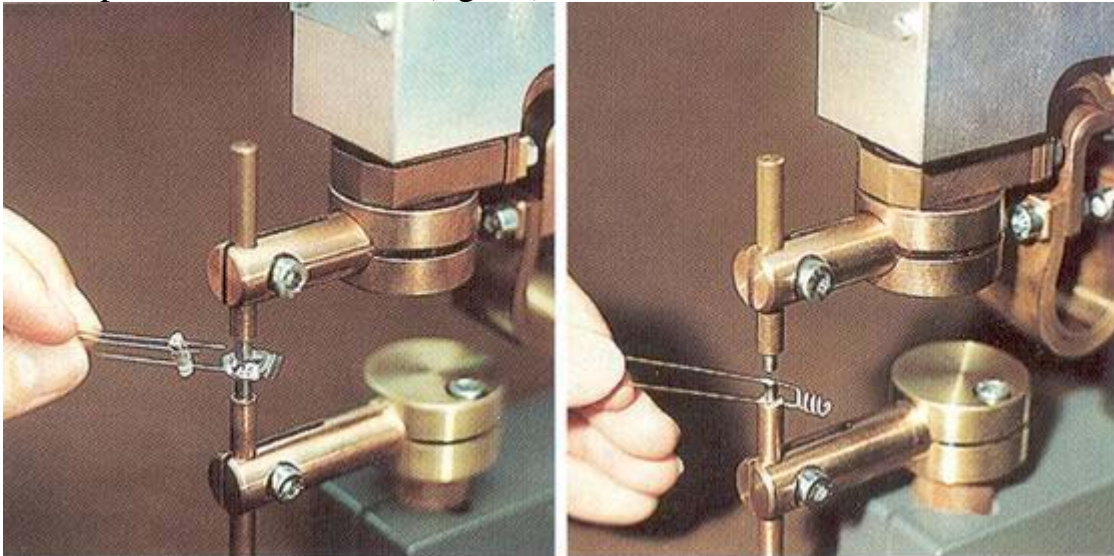
La scelta corretta del materiale degli elettrodi influisce sulla qualità del singolo giunto saldato e perciò anche sull'uniformità nella produzione di serie; oltre però alla valutazione dei fattori qualitativi e tecnologici in senso stretto, un criterio decisivo nell'operare la scelta del materiale è la sua resistenza all'usura (legata al massimo tempo di permanenza dell'elettrodo in macchina). Nell'appendice si trovano i riferimenti per la scelta degli elettrodi e la saldabilità di abbinamenti di materiali. Anche la forma degli elettrodi influisce in modo determinante sul risultato della saldatura. Grosse superfici di appoggio degli elettrodi favoriscono il deflusso del calore. Con ciò si riduce la deformazione e la colorazione della superficie dei pezzi. Superfici di appoggio ridotte sono necessarie per la saldatura di materiali sensibili o buoni conduttori, cosicché, nonostante corrente e resistenza basse venga raggiunto il punto di fusione.

*Fig. 29: saldatrice orizzontale per bobina autoveicolo*



### 4.3 Elettrodi di saldatura

Gli elettrodi di saldatura non trasferiscono al pezzo soltanto la corrente di saldatura, ma anche la forza. Devono perciò allo stesso modo soddisfare criteri di natura elettrica e meccanica. Forma, massa e materiale dell'elettrodo, o più correttamente, la sua conducibilità elettrica e termica, hanno un effetto immediato sull'equilibrio termico del processo di saldatura (fig. 30).



*Fig. 30: Gli elettrodi devono rispondere a esigenze diverse*

**Rame usato come materiale base** - Le esigenze cui dovrebbe rispondere il materiale dell'elettrodo sono le più diverse e talvolta purtroppo inconciliabili. Perciò il rame, quale materiale base, viene mescolato con altri elementi per ottenere il compromesso più idoneo a soddisfare le singole necessità (vedi appendice), di seguito elencate:

#### **Caratteristiche importanti -**

- *Elevata conducibilità elettrica:*

presente in caso di resistenza dell'elettrodo molto bassa. Oltre al materiale, anche la forma ha una precisa influenza sulla conducibilità.

- *Elevata conducibilità termica:*

la forma e la massa dell'elettrodo influenzano la conducibilità termica. Da ciò consegue che anche la disposizione e il tipo di fori per il raffreddamento hanno un influsso diretto.

- *Elevata durezza a freddo e a caldo:*

la durezza a caldo è un criterio per la durata degli elettrodi. La durezza a freddo non dovrebbe diminuire troppo neanche dopo un impiego alle massime temperature di esercizio.

- *Elevata resistenza al rinvenimento:*

Essa ci dice fino a quale temperatura di lavoro i valori di durezza in un determinato intervallo di tempo (a temperatura costante) non variano. Al raggiungimento della temperatura di ammolimento i valori di durezza diminuiscono rapidamente e di conseguenza la temperatura di lavoro alla superficie di contatto diventa eccessiva.



- *Bassa tendenza all'alligazione*

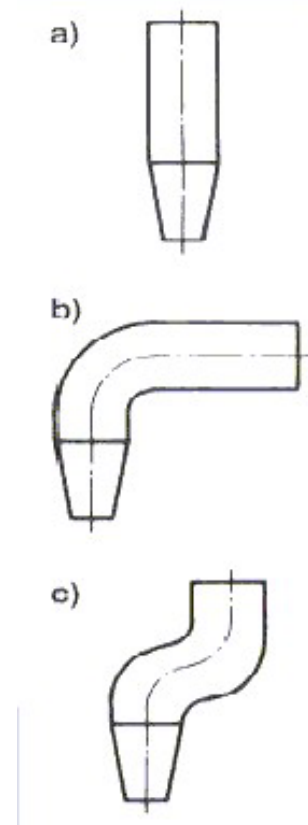
Il materiale dell'elettrodo tende sempre a legarsi con il materiale dei particolari da saldare se si supera la temperatura di lavoro consentita alla punta degli elettrodi. Questo capita quando la resistenza di contatto è troppo elevata e la potenza aumenta. In commercio si trovano diversi materiali per elettrodi, che devono essere scelti in ragione dei materiali da saldare. Di seguito sono riportati le più importanti classi di materiali per elettrodi e il loro campo d'impiego:

#### **Normale classificazione commerciale del materiale per elettrodi**

- **Classe 0** – rame elettrolitico (E-Cu) trafilato a freddo, per la saldatura di alluminio e leghe leggere;
- **Classe 2** – rame cromo (CuCr; CuCrZr), per la saldatura di acciaio, acciaio legato, leghe di nichel, ottone e bronzo;
- **Classe 3** – rame cobalto berillio (CuCoBe), per la saldatura di acciai altamente legati, leghe di cromo nichel, monel;
- **Classe 6** – rame tungsteno (CuW, CuWAg), per la saldatura di metalli non ferrosi, con elevato tenore di rame;
- **Classe 7** – tungsteno (W, WL), brasato forte in supporti di rame, per la saldatura di rame e argento; per la brasatura a resistenza e la rivettatura a caldo;
- **Classe 8** – molibdeno (Mo), brasato forte in supporti di rame, per la saldatura di rame e argento.

I più importanti materiali per elettrodi sono riportati nella norma DIN 44759. Come già detto è importante nella saldatura a resistenza anche la forma dell'elettrodo. Nella Fig. 31 sono esemplificate alcune tipiche forme di elettrodo.

*Fig. 31:*  
*Forme tipiche degli elettrodi*  
 a) *dritta*  
 b) *angolare a 90°*  
 c) *fuori asse*



#### 4.4 Controllo e gestione della corsa dell'elettrodo di saldatura

Quando il particolare da saldare si riscalda per effetto del passaggio di corrente, va evitato che l'elettrodo venga ostacolato nel suo movimento o addirittura perda il contatto con il pezzo da saldare. La conseguenza di questo sarebbe una saldatura incostante e, in certe condizioni, la generazione di spruzzi. Il cilindro di saldatura deve perciò essere in grado di seguire nel più breve tempo possibile il cedimento, dovuto all'effetto combinato di calore e pressione, dei particolari. Secondo come ciò avviene si parla di buono o cattivo rapporto di "compenetrazione".

**Progettazione in linea con il concetto di riduzione delle masse in movimento e dell'attrito radente** - Per garantire che l'elettrodo segua in modo appropriato la deformazione del pezzo vi sono diversi accorgimenti di cui tenere conto nel progetto di un impianto. I criteri più significativi in questo caso sono il contenimento delle masse mobili e la massima riduzione degli attriti. I portaelettrodi devono essere progettati in modo da essere i più leggeri possibili. I pacchi lamellari di collegamento tra portaelettrodi testa, oltre che leggeri devono essere anche massimamente flessibili. Utilizzando apposite guarnizioni a membrana in gomma si ha al tempo stesso la tenuta dei cilindri ed un attrito assai contenuto, che si riflettono positivamente sulla fase di compenetrazione dell'elettrodo. Le teste meccaniche (in cui la pressione di saldatura è realizzata tramite una molla) e ancor più le teste a servomotore rappresentano soluzioni ancora più avanzate sulla via del raggiungimento di una pressione costante in fase di saldatura.

#### 4.5 Progettazione dei pezzi conforme ai principi della saldatura a resistenza

Il criterio con cui viene progettato un particolare che successivamente dovrà essere saldato a resistenza è decisivo per l'ottenimento di una buona giunzione. Anche se i materiali dei singoli particolari sono stati scelti in modo appropriato, ma la geometria del pezzo non è altrettanto corretta, si avranno comunque effetti negativi sulla sua saldabilità.

**Accessibilità da entrambi i lati** - Poiché la saldatura a resistenza è un processo di saldatura per contatto, cioè è necessario che gli elettrodi si appoggino sui pezzi da saldare, deve essere innanzitutto garantita una adeguata accessibilità alla zona di saldatura, possibilmente da entrambi i lati. E' altresì possibile una saldatura con entrambi gli elettrodi da un solo lato, ma questa soluzione dovrebbe essere evitata se non altro per ragioni di costo. Bordi e flangie sui pezzi rendono più semplice uno stabile appoggio degli elettrodi.

Per risparmiare peso e materiale spesso nella pratica si eseguono flangie eccessivamente ridotte. La conseguenza di ciò sono saldature su spigoli o bordi che tra l'altro non permettono la precisa disposizione degli elettrodi. Anche se in qualche caso, formando opportunamente gli elettrodi, è possibile aiutare il processo di saldatura, è comunque molto più economico se già in fase di progetto si prevede uno spazio sufficiente per gli elettrodi.

Inoltre è necessario che gli elettrodi siano perpendicolari rispetto alla superficie del pezzo in lavorazione (vedi figura 32a). Per evitare difficoltà il progettista deve curare che per la realizzazione della giunzione si possano impiegare elettrodi più corti possibile e soprattutto portaelettrodi e bracci di forma stabile e solida. In caso di progetti che non permettono una buona accessibilità, è possibile spesso trovare soluzioni alternative. Con elettrodi di forma particolare si possono trarre concreti vantaggi. Va però osservato che, se la forma dell'elettrodo si complica, non è spesso più possibile portare una sufficiente pressione di saldatura. In questi casi si rivela problematico anche un corretto raffreddamento dell'elettrodo di saldatura.

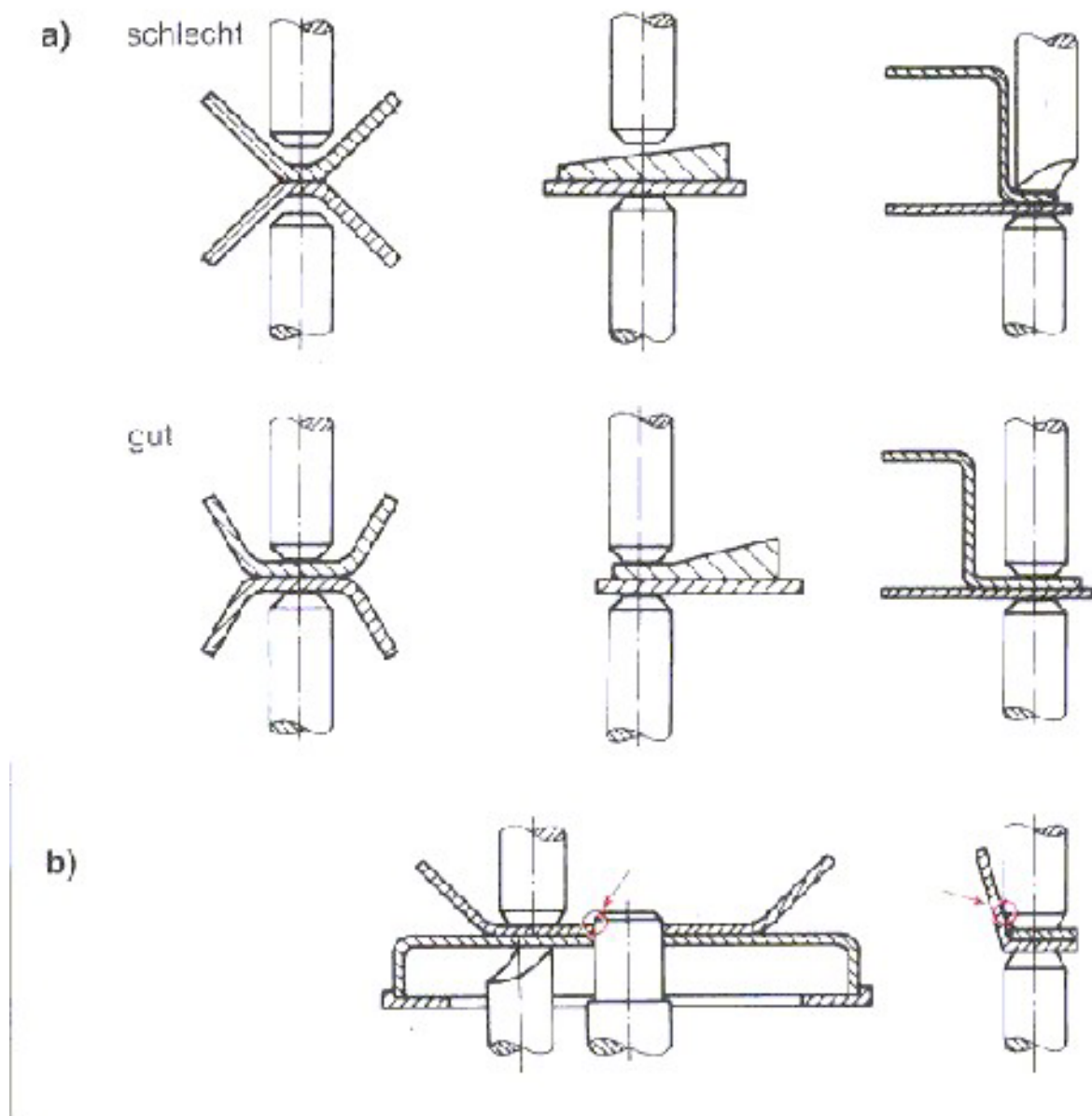


Fig. 32:

- a) Esempi di particolari con cattiva (*schlecht*) e buona (*gut*) accessibilità
- b) Esempi di pezzi disposti in modo da dare luogo a derivazioni di corrente

**Evitare le derivazioni** - Un punto molto importante, che deve essere valutato in fase di progetto delle attrezzature, è la necessità di evitare possibili derivazioni (vedi figura 32b). Correnti che, per derivazione, fluiscono incontrollatamente, risultano mancanti alla posizione di saldatura. Pieghe o irregolarità nei pezzi creano problemi. Anche però se parti del pezzo o dell'attrezzatura di posaggio vengono in contatto con l'elettrodo si verifica una derivazione. Se si progettano i particolari tenendo conto delle peculiari caratteristiche e modalità della saldatura a resistenza è possibile senz'altro evitare queste indesiderate derivazioni.

**Rapporto tra spessori** - Quando si progetta qualcosa che debba poi essere saldato a resistenza è necessario evitare che vi siano rapporti tra i vari spessori delle sue parti maggiori di 1:3. Ciò vale anche per giunzioni a più strati di più di quattro lamiere. Giunzioni di parti con spessori differenti sono la quotidianità nel campo della saldatura a resistenza e sono senz'altro eseguibili se si rimane nell'ambito del rapporto di spessore sopraccitato.

**Minimizzare le perdite induttive** - Se si lavora con comandi di saldatura a corrente alternata questo fatto può avere riflesso sulla progettazione dei particolari. A causa dell'accoppiamento induttivo con il circuito secondario, masse magnetiche disposte entro la finestra secondaria di questi impianti diminuiscono la corrente di saldatura. L'impedenza secondaria varia. La progettazione dei pezzi, ma anche delle attrezzature, deve prevedere un contenuto ferroso minore possibile o perlomeno costante. Attrezzature poste nelle immediate vicinanze del circuito secondario devono essere costruite in materiali amagnetici. Questa problematica passa però in secondo piano se si lavora con comandi di saldatura a corrente costante, che compensano eventuali variazioni di impedenza.

#### **4.6 Meccanizzazione del processo**

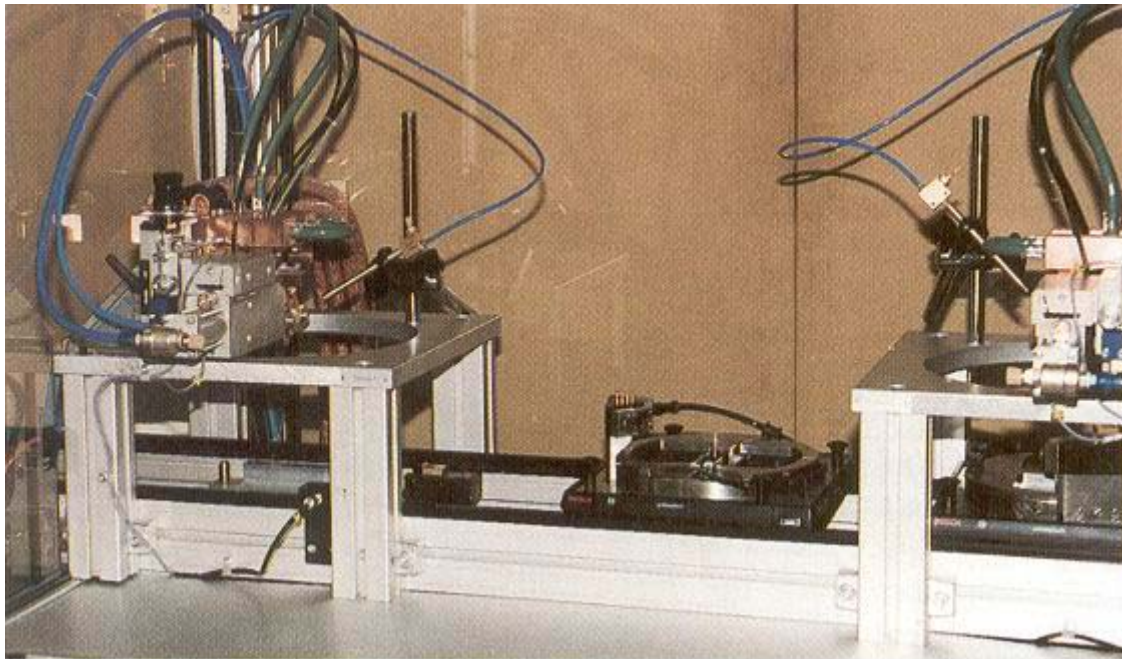
Nella produzione di piccoli particolari, per esempio componenti di sottogruppi in campo elettrotecnico o elettronico, sono in gioco quasi sempre grandi lotti di piccoli pezzi uguali. Nelle moderne saldatrici con comando elettronico i margini di aumento della produttività per effetto di una diminuzione dei tempi principali sono esigui. Ciò nondimeno, il processo offre spazio per un incremento della capacità produttiva, se con l'impiego di attrezzature aggiuntive i tempi accessori vengono ridotti.

**Automazione** - Per elevare la cadenza produttiva ai livelli eventualmente prescritti, vengono progettate macchine ove in diverse stazioni di lavoro i pezzi vengono immagazzinati, alimentati e scaricati automaticamente. Vi sono molteplici possibilità in questo campo; cominciando dalle tavole girevoli (fig. 33), passando agli alimentatori lineari (fig. 34) e a tutte le forme e tipi di pinze, fino ad arrivare ai robot industriali, tutti i moderni mezzi di automazione sono impiegabili per la saldatura a resistenza. La scelta viene sempre fatta in base al caso particolare di volta in volta affrontato.



*Fig. 33*  
*Saldatrice semiautomatica a*  
*tavola rotante*

*Fig. 34*  
*Stazione di una linea*  
*automatica ove sono inseriti*  
*moduli per saldatura a*  
*resistenza*

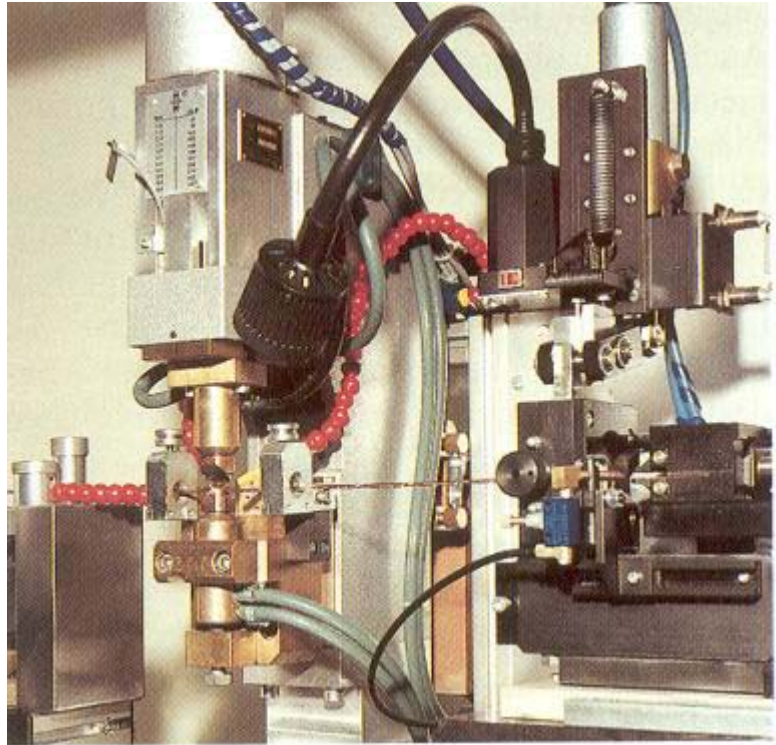


**Piccoli particolari** - La produzione di piccoli pezzi implica la loro manipolazione. Può trattarsi di materiale sfuso, che deve essere singolarizzato, ordinato, alimentato oppure immagazzinato, oppure di particolari già ordinati in appositi contenitori, che possono accogliere una determinata quantità di pezzi. Alimentatori a spirale o vibratori per l'alimentazione di particolari sfusi sono frequenti nel campo della saldatura a resistenza automatizzata, tanto quanto combinazioni di cassette e pinze di presa per magazzini. La singolarizzazione nella posizione di saldatura viene effettuata in una molteplicità di casi da piani orizzontali a più posizioni con riferimenti meccanici. L'alimentazione di fili o nastri può essere realizzata con relativa



semplicità impiegando aspi. In questi casi sono perlopiù necessari solamente dispositivi aggiuntivi per il taglio del materiale (fig. 35). In linea generale si può dire che praticamente tutti i tipi di alimentazione sono combinabili con impianti per la saldatura a resistenza.

*Fig. 35:  
Saldatrice con portaelettrodi  
ed elettrodi per compattatura  
di una trecciola in Cu..  
Per lo stesso compito, in  
abbinamento con teste di  
saldatura, sono sempre più in  
uso speciali dispositivi con  
blocchetti ceramici di  
contenimento, che permettono  
di ottenere un sezione della  
zona compattata praticamene  
quadrata.*



**Saldatura multipla** - Un'ulteriore possibilità per aumentare la produttività attraverso la meccanizzazione appare inizialmente molto semplice: l'esecuzione di una saldatura multipla. Qui si sceglie, nella forma più semplice, una doppia testa di saldatura che con una sola corsa lavora due pezzi contemporaneamente. Questa soluzione può venire adottata indipendentemente da ogni altra possibilità di meccanizzazione o con ogni pensabile configurazione di automatismo.

**Camere ad atmosfera controllata o sotto vuoto** - Alcuni speciali impieghi nel campo della saldatura necessitano di essere eseguiti in una particolare atmosfera o con un certo livello di vuoto, oppure ancora in un ambiente a temperatura costante. Impianti per saldatura a resistenza con camere ad atmosfera controllata o sotto vuoto, già realizzati innumerevoli volte, possono rispondere anche a queste esigenze. Soprattutto nella produzione di componenti elettronici con parti che devono essere incapsulate in un ambiente assolutamente puro queste camere assumono un ruolo di primaria importanza.

#### **4.7 Garanzia della Qualità**

Nella saldatura a resistenza la garanzia della qualità significa assicurare che un pezzo sia di volta in volta conforme al profilo qualitativo richiesto. Come ogni processo di saldatura, per un giudizio univoco sulla qualità del giunto non si può prescindere da

prove distruttive. Anche qui, con una determinata frequenza, devono essere prelevati in modo casuale dalla produzione di serie campioni da provare. D'altra parte però la qualità della saldatura a resistenza può essere controllata "on-line" tramite la verifica di innumerevoli parametri di processo, così da ridurre al minimo la necessità di eseguire prove distruttive.

**SPC...** - In questo modo sui moderni impianti automatici di saldatura è generalmente possibile produrre con l'ausilio di un controllo statistico di processo (SPC - Statistical Process Control). L'elaborazione e la valutazione statistica dei dati ricavati dai controlli "on-line" è la solida base sulla quale poggia il raggiungimento dello standard qualitativo più elevato.

**...e FMEA** - Già in fase di progetto di un dispositivo di saldatura diversi produttori prevedono un processo FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). In questo modo è possibile analizzare preventivamente possibili errori di processo che possono essere evitati adottando adeguate contromisure. Per potere produrre grandi lotti con una qualità costante, oltre naturalmente ad un controllo o un eventuale trattamento preventivo dei pezzi, anche la macchina deve essere gestita in modo opportuno e fornire determinate prestazioni. I parametri di volta in volta individuati per i diversi pezzi da saldare devono essere impostati esattamente e il consumo dell'elettrodo deve essere controllato costantemente. Anche la manutenzione prescritta deve essere eseguita con regolarità.

**Apparecchi di misurazione e controllo** - I produttori di saldatrici a resistenza offrono una serie completa di strumenti per la misurazione e la verifica del processo di saldatura, con i quali effettuare il controllo di qualità. Ciò avviene in forma di verifica dei parametri dipendenti dalla macchina (vedi capitolo *Sistemi di misura e controllo*). Questi apparecchi vengono impiegati per i seguenti scopi:

- Misura dei valori e loro protocollo,
- Sorveglianza di una saldatrice durante la produzione al fine di garantire che i parametri nominali impostati vengano mantenuti,
- Impostare in modo uguale i parametri di diverse saldatrici adibite allo stesso compito,
- Riprodurre l'impostazione di una macchina per una determinata saldatura dopo che la macchina stessa per un certo tempo è stata impiegata per uno scopo diverso,
- Verificare se un certo impianto in condizione di funzionamento mantiene i parametri nominali.

Con il controllo dei parametri che dipendono dalla macchina possono essere tratte solo conclusioni indirette sulla qualità di un giunto saldato. Essa può infatti essere influenzata da una quantità di fattori come p. e. l'alimentazione (tensione, aria compressa, acqua di raffreddamento), le condizioni di produzione o lo stato del pezzo in lavorazione. Ciò vuol dire che, per poter valutare in modo statisticamente attendibile la qualità di saldatura è necessario tenere sotto controllo contemporaneamente tre grandezze diverse tra loro indipendenti.

Quando si riscontra una sicura causalità statistica tra una grandezza e la qualità della saldatura, ne consegue il pensiero di non utilizzare semplicemente la grandezza

rilevata in combinazione con un segnale di buono/scarto alla fine del singolo processo di saldatura, bensì di seguirne il suo andamento durante lo svolgersi del processo stesso e, quando esso devia da una curva di riferimento, regolarlo in modo da ricondurlo a quel tracciato. Nelle industrie moderne ciò è sempre più utilizzato, cosicché oggi negli impianti automatici la certificazione della qualità è divenuta uno standard.

#### 4.8 Applicazioni industriali

**Aree di utilizzo** - E' difficile immaginare un settore della produzione di piccoli particolari dove la saldatura a resistenza a pressione non trovi applicazione (fig. 36). L'intero settore dell'elettrotecnica per l'auto per esempio - piccoli motori, antenne telescopiche, sistemi ABS, accendisigari, iniettori, spinterogeni, indicatori di direzione, lampade bilux, e l'elenco potrebbe proseguire indefinitamente - non può da anni rinunciare ai vantaggi offerti dall'impiego di questa tecnologia. Si annoverano inoltre tra gli abituali settori d'impiego la strumentistica, l'elaborazione dati, l'ottica, l'elettrodomestico, gli strumenti chirurgici, le macchine da ufficio, i giocattoli, gli orologi, la posateria, gli articoli in cuoio ecc.- ovunque insomma si trovano giunzioni saldate, realizzate con questo processo di saldatura.



*Fig. 36:  
Lampada bilux per auto. Viene eseguita una saldatura multipla. Tramite diverse proiezioni la lampada viene saldata a una corona esterna. Per ogni proiezione viene impiegata una piccola testa di saldatura (delle dimensioni di un pacchetto di sigarette). Sono presenti saldature anche all'interno del bulbo. I diversi tipi di lampade sono tra i pezzi che meglio si adattano a essere lavorati con saldatrici a resistenza.*

Se si definiscono piccoli pezzi quelli con una massa inferiore a 50g e uno spessore minore di 1 mm, è poi facile fare il passo verso la cosiddetta microtecnologia. Il livello raggiunto dalla microsaldatura ha infatti aperto una molteplicità di nuovi settori d'impiego.

**Oltre la saldatura** - Per le saldatrici a resistenza v'è inoltre un'intera serie d'impieghi potenziali, che non hanno nulla a che fare con la vera e propria saldatura a

resistenza. Tutti i processi, di giunzione o meno, per i quali pressione e calore sono necessari, possono di norma essere realizzati con queste macchine.

È così possibile imbastire particolari per prepararli ad altri processi come la saldatura a laser o a fascio elettronico, la brasatura con microfiamma, forno o induzione. In questo modo si evitano costose attrezzature di posaggio, soggette ad usura.

Allo stesso modo, in presenza di materiali non saldabili come alcuni acciai per molle o sinterizzati, è possibile effettuare una rivettatura a caldo.

Anche la stessa brasatura debole e forte può essere eseguita con una saldatrice a resistenza, in particolare quando si tratta di pezzi che, per la loro elevata conducibilità e per la dimensione delle aree di giunzione, mal si prestano a una pura saldatura senza materiale d'apporto.

Di seguito riportiamo un riassunto delle possibilità di impiego ulteriori del processo:

- *Rivettatura*: giunzione di metalli con plastica e ceramica;
- *Ricalcatura*: formatura di metalli;
- *Tempra*: modifica della struttura per indurire;
- *Ricottura*: modifica della struttura per rendere tenero;
- *Separazione*: taglio elettrico, specialmente di fili e profili;
- *Imbastitura*: fissaggio per successiva brasatura;
- *Attaccatura*: fissaggio di preformati in lega per successiva brasatura;
- *Brasatura debole*: giunzione tramite leghe bassofondenti;
- *Brasatura forte*: giunzione tramite leghe altofondenti;
- *Rifusione*: giunzione di parti prestagnate
- *Incollatura*: giunzione di parti metalliche tramite colle

## 4.9 Esempi pratici

In questo capitolo verranno descritte alcune applicazioni particolari. Esse sono prese a titolo di esempio tra centinaia di altre nella produzione di piccoli pezzi con saldatura a resistenza.

### **Produzione di montature per occhiali**

**Materiali diversi e profili** - Nella produzione di montature metalliche per occhiali si saldano differenti materiali e profili di forma diversa. Ciò avviene già dagli anni '60. E fino ad oggi il processo a resistenza rimane uno dei preferiti in questo campo, è necessario affrontare e risolvere diverse problematiche di giunzione: saldatura di teste di pernetti sottili e di bussole filettate, saldatura a punto di stanghette in filo e ponti in profilo, saldatura a proiezione di blocchettini di tensionamento e cerniere.

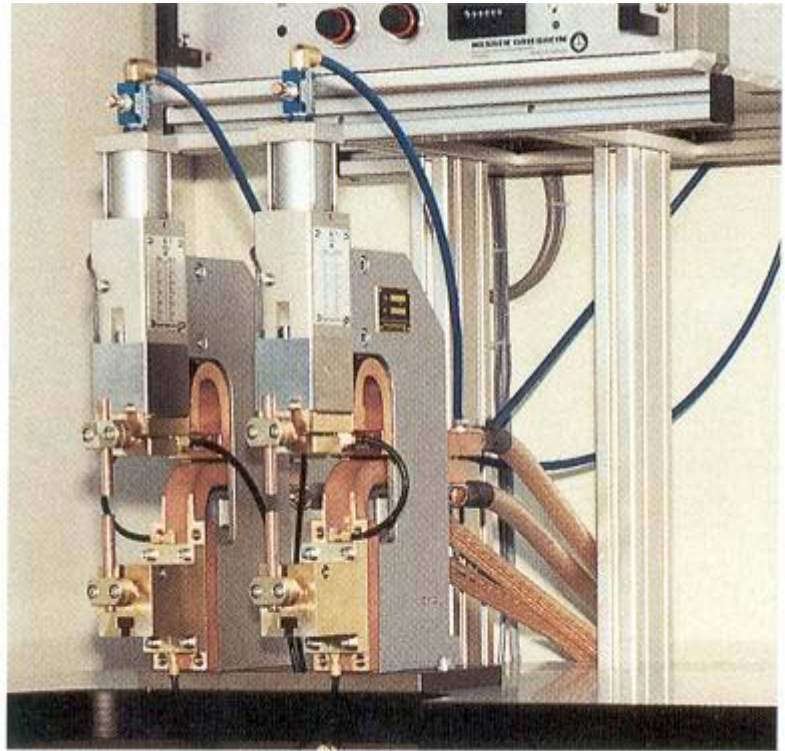
La fig. 37 mostra un impianto con due teste di saldatura alimentate da una sorgente.

In uno di questi posti di lavoro possono essere eseguite in sequenza su un particolare saldature uguali o diverse. Viene qui scelta come modalità di funzionamento la corrente costante o la potenza costante.



*Fig. 37:*

*Impianto di saldatura a teste gemelle per l'esecuzione di saldature a punto, a proiezione, di testa, così come per l'imbastitura di piccole strutture che successivamente devono essere brasate (p. es. montature metalliche per occhialeria).*

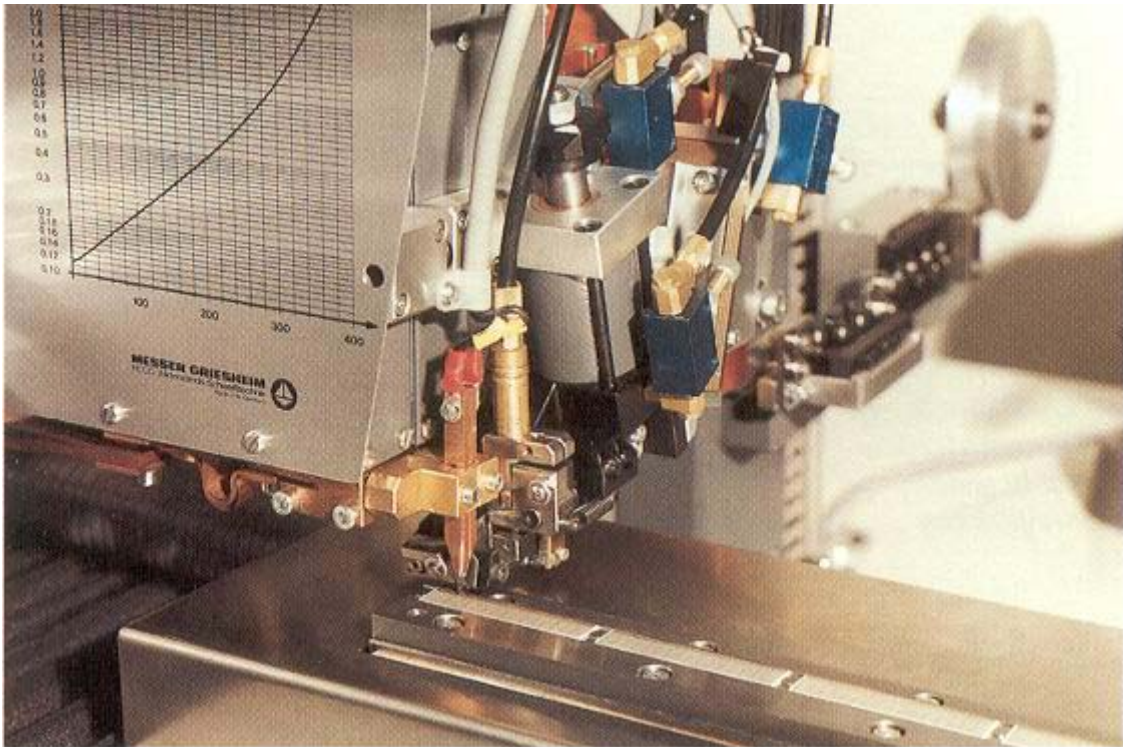


### **Saldatura ad elettrodi paralleli su elementi con riporto di strati metallizzati**

Nella giunzione meccanizzata di fili di collegamento a resistenze metallizzate in Pt le saldatrici a resistenza hanno trovato ampio riconoscimento (fig.38). Un filo tondo e un filo a sezione quadra con spessore variabile tra 0,2 e 0,3 mm vengono svolti da un aspo, saldati su un substrato ceramico metallizzato e tagliati a misura. Il portapezzo, che integra un dispositivo per il riscaldamento dei substrati, è montato su una slitta trasversale azionata da un motore a passi. La testa di saldatura doppia lavora con un sistema di impostazione meccanica della forza, ma il movimento è ottenuto per via pneumatica. Il ciclo di lavoro è gestito da un controllo numerico.

**Saldatura a diffusione** - Questo processo di giunzione è basato sul principio della saldatura a diffusione e realizzato con l'ausilio di un comando a corrente continua con funzionamento a corrente costante.

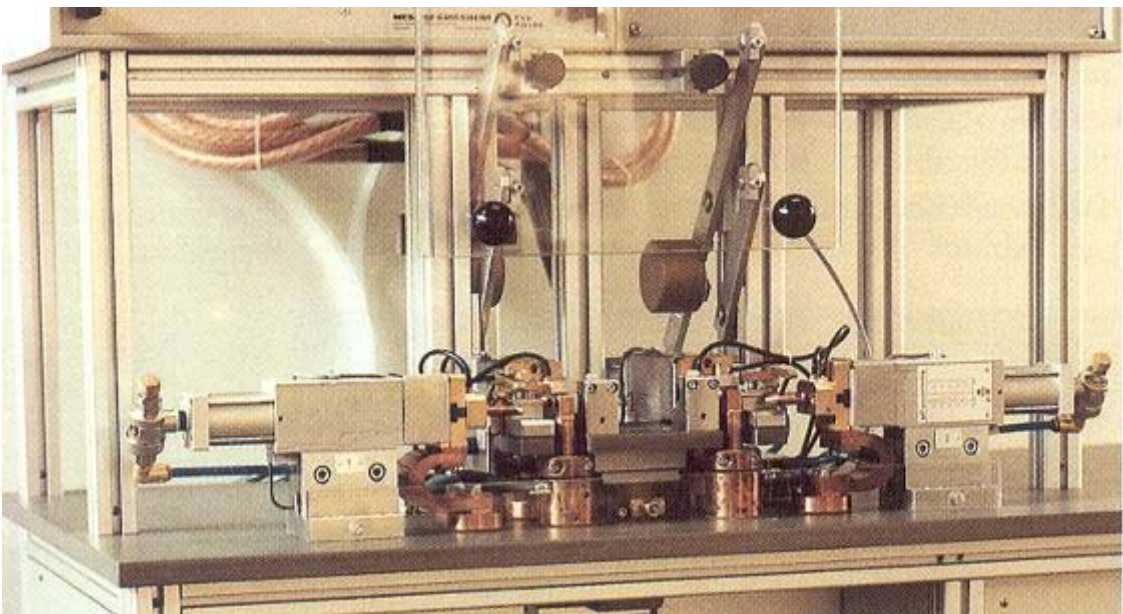




*Fig. 38:  
Saldatura a resistenza “parallel gap” di fili di connessione a una resistenza di misura metallizzata in Pt.*

### **Saldatura a punto su custodie in lamiera**

In figura 39 è visibile un impianto di saldatura a più teste per il fissaggio di staffe angolari a una custodia in lamiera, che in questo caso particolare serve come portaceneri per autoveicoli.



*Fig. 39:  
Impianto di saldatura a più stazioni con 4 teste di saldatura disposte orizzontalmente*

**Materiali ricoperti da strati superficiali critici-** A causa della limitata saldabilità della superficie dei particolari presi in esame (presenza di zincatura e fosfatatura) è stata anche qui scelta una sorgente a corrente continua regolata a transistori. I singoli pezzi vengono bloccati nel portapezzo, che garantisce la tolleranza necessaria al pezzo e che può oscillare lungo due assi per adattarsi agli elettrodi delle teste, disposte orizzontalmente, quando essi, in sequenza, si appoggiano. Le quattro teste di saldatura vengono alimentate in cascata da una stessa sorgente di corrente. Per la lavorazione di metalli con strati superficiali multipli, viene scelta una modalità di funzionamento a corrente costante, o meglio ancora a potenza costante.

### **Saldatura a tenuta ermetica di circuiti ibridi**

**Camere climatiche** – Come già più volte accennato, componenti particolari come circuiti di commutazione per microelettronica di computer, comandi ferroviari, sensori, elementi optoelettronici e simili debbono essere incapsulati entro custodie metalliche, in camere climatiche. Per questo scopo si utilizzano impianti con camere di lavoro riempite di azoto, nelle quali vengono inserite le saldatrici (fig.40).



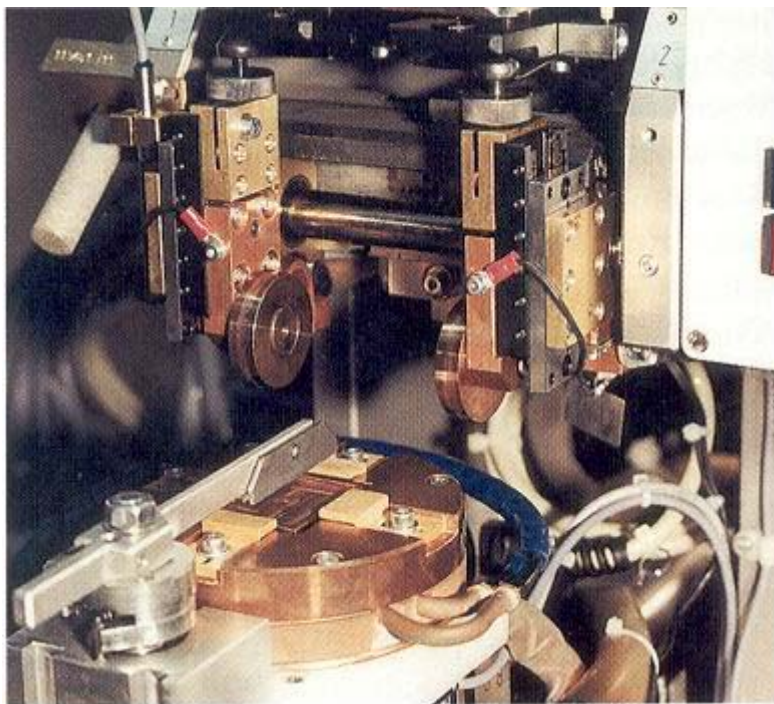
*Fig. 40:  
Impianto con camera climatizzata  
al cui interno è disposta una  
saldatrice parallel gap in  
esecuzione a rulli, per la cucitura  
ermetica di custodie metalliche a  
basette di componenti della  
microelettronica*

I particolari vengono messi e tolti dalla camera climatica attraverso un forno a camera evaquabile. Il perimetro delle custodie, generalmente a forma di piccola vaschetta, può essere rettangolare, rotondo o poligonale. Il coperchio viene saldato con cucitura parallela tramite due elettrodi a rulli, alimentati ciascuno da una sorgente indipendente. In presenza di custodie ceramiche il coperchio, sul suo strato superiore metallizzato, viene fissato al corpo attraverso una brasatura a rulli, con l'interposizione di una placcatura in lega per brasatura forte. I movimenti della testa di saldatura e del portapezzo sono ottenuti tramite motori passo-passo, azionati da controllo numerico. Grazie alla regolazione a potenza costante è possibile produrre cuciture assai uniformi con un livello di perdite minimo (fig. 41).



*Fig. 41:*

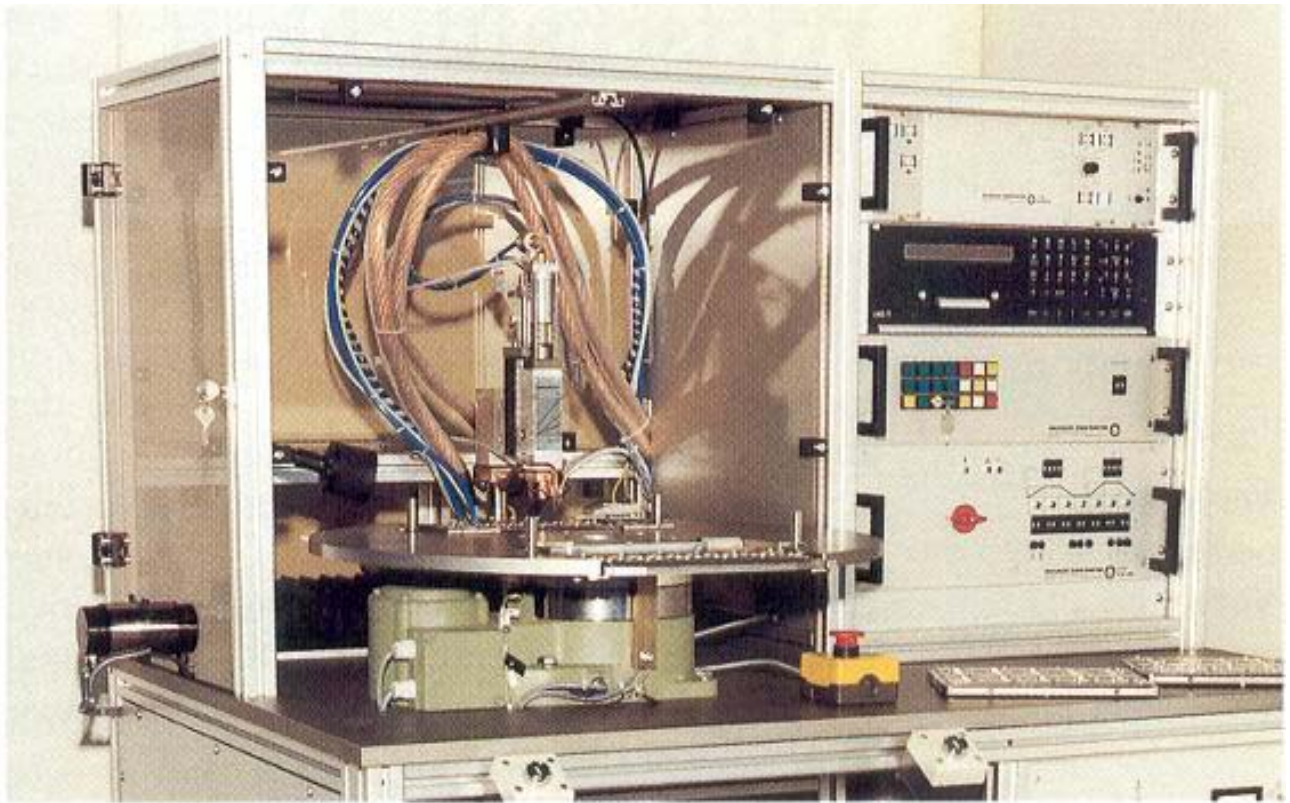
*Particolare di una testa a rulli paralleli come quella contenuta nell'impianto climatizzato di Fig. 40 – Oltre che per la saldatura può essere utilizzata per la brasatura di custodie metalliche.*



### **Saldatura a punti meccanizzata di piccoli pezzi disposti in pallet multipli**

L'impianto visibile in figura 42 permette la saldatura a punto di piccoli pezzi disposti in pallet multipli. Un magazzino pieno viene caricato nella stazione anteriore di carico di una tavola rotante, ruotato nella posizione di lavoro posteriore, dove vengono effettuate, da una testa di saldatura montata su una slitta a croce xy, azionata da motore passo-passo, le saldature del caso. Mentre ciò avviene viene sostituito dall'operatore il pallet contenente i pezzi precedentemente saldati con un nuovo pallet carico di pezzi da saldare. I diversi movimenti e le coordinate vengono memorizzati in un comando a controllo numerico, mentre i parametri di processo in un comando di saldatura programmabile. Tramite una codifica impressa sul pallet è possibile riferire ad ogni pallet uno specifico programma, oppure anche diversi programmi che cambiano con una determinata sequenza. La testa di saldatura è progettata in questo caso appositamente per il funzionamento in un impianto meccanizzato. Essa permette una regolazione della forza degli elettrodi programmabile, masse senza gioco e slitte di guida a basso attrito, oltre ad un ampio campo di regolazione della forza, fino al limite inferiore di 1,0 N. Con un sensore induttivo può essere controllato l'assestamento degli elettrodi durante la saldatura. Insieme alla regolazione di potenza del comando di saldatura è possibile così disporre di un doppio controllo di processo, che consente di ottenere una costante ed elevata qualità produttiva.

**Tecnica ai massimi livelli** - Quest'impianto è un esempio dell'elevato standard raggiunto dalla saldatura a resistenza e riunisce in sé diversi sviluppi: tavole rotanti con pallet multipli codificati, movimenti su coordinate della testa di saldatura gestiti da controllo numerico, memorizzazione di programmi con tutti i diversi parametri di saldatura, inclusa la forza degli elettrodi, nonché una regolazione in tempo reale del processo, mantenendo costanti potenza di saldatura e compenetrazione degli elettrodi.



*Fig. 42:  
Impianto di saldatura meccanizzato per la saldatura a punti di sottosistemi per lampade.*