

## 18. SALDATURA E BRASATURA

La saldatura è l'unione di due elementi costituiti dallo stesso metallo (o da metalli simili) riscaldati localmente ad una temperatura più alta di quella di fusione; se necessario, si può aggiungere nel bagno di fusione un "materiale d'apporto", compatibile con i metalli base, che serve per riempire il giunto saldato. Esiste anche un particolare tipo di saldatura, denominata brasatura, nella quale la giunzione fra i due metalli si realizza fondendo solo il metallo d'apporto. (Si vedrà in seguito che esistono anche saldature nelle quali l'unione avviene ad una temperatura più bassa di quella di fusione dei metalli).

In campo aeronautico la saldatura è sempre stata vista con un certo sospetto, poiché introduce tutta una serie di problematiche riguardanti difettologie, resistenza a fatica, resistenza a corrosione, tensioni residue e distorsioni. E' comunque una tecnica economica e che può risolvere problemi specifici; attualmente è prevedibile un maggior impiego della saldatura in campo aeronautico, anche per la comparsa di nuovi processi che risolvono, almeno in parte, alcuni dei problemi. In campo spaziale la saldatura è una tecnica praticamente insostituibile, essendo necessario garantire l'ermeticità delle giunzioni per i veicoli abitati, obiettivo praticamente irraggiungibile con la chiodatura.

Per completezza di esposizione, si vedranno anche la saldatura con cannello ossiacetilenico e la saldatura con elettrodo rivestito, anche se queste tecniche non trovano applicazione nel settore aeronautico.

**Saldatura ossiacetilenica.** Alcune tecniche di saldatura utilizzano la combustione di un gas per fondere il metallo. Fra i possibili gas la miscela ossigeno e acetilene è quella che sviluppa la maggior quantità di calore e può quindi essere utilizzata anche per la saldatura degli acciai. Ossigeno e acetilene sono contenuti in bombole (le bombole contenenti gas hanno colorazioni diverse per consentirne il rapido riconoscimento; bianco per l'ossigeno, arancio per l'acetilene, ecc.). Per la saldatura si utilizza una torcia, alimentata contemporaneamente dai due gas, fig.1. La quantità di ciascun gas può essere variata tramite una valvola. Nella torcia i gas si miscelano ed escono dall'ugello terminale dove la miscela viene accesa. La temperatura massima raggiungibile nella saldatura ossiacetilenica è dell'ordine di 3000°C; la saldatura non è automatizzabile e richiede una certa capacità da parte dell'operatore. La saldatura avviene avvicinando il cannello al metallo fino a creare una zona fusa. A questo punto il cannello viene spostato lungo interfaccia dei due pezzi da unire, con una velocità tale da mantenere inalterata la dimensione della zona fusa, fig. 2. Piccoli spessori (2-3 mm) possono essere saldati semplicemente fondendoli lungo i bordi, che devono solo essere sufficientemente accostati (non oltre 0.5 mm), fig. 3. Spessori leggermente più grandi possono essere saldati allontanando i due lembi da saldare e riempiendo con metallo d'apporto il giunto., fig. 3. Per spessori ancora maggiori è necessaria la lavorazione dei bordi (cianfrino) con mola o fresatrice per ridurre localmente lo spessore, fig. 4. In questo caso è indispensabile utilizzare un materiale d'apporto che serve per riempire il cianfrino, eventualmente effettuando diversi passaggi di saldatura.

Prima della saldatura le lamiere devono essere accuratamente pulite per eliminare vernici, ossidazione e tracce di olio o grasso. Con il cannello ossiacetilenico si saldano gli acciai e si effettuano le brasature forti (brasature realizzate con un metallo avente una temperatura di fusione alta, ma sempre inferiore a quella del metallo base). La saldatura delle leghe leggere è possibile ma richiede notevole capacità per la elevata conduttività termica dell'alluminio e per la presenza in superficie di uno strato di ossido refrattario. Ancora più difficoltosa è la saldatura con cannello ossiacetilenico delle leghe di magnesio.

Con un particolare tipo di cannello si possono tagliare gli acciai (taglio ossidrico); questa tecnica è utilizzata nella carpenteria. Nel cannello per taglio ossidrico esiste un secondo ingresso per l'ossigeno, che viene aperto dopo aver riscaldato il materiale da tagliare. L'eccesso di ossigeno trasforma l'acciaio in ossido di ferro fuso, che cade per gravità sotto forma di gocce, lasciando un taglio avente uno spessore di qualche millimetro. Il taglio degli acciai effettuato in questo modo è veloce ed economico, ma la qualità del taglio non è buona; il bordo tagliato presenta irregolarità e ovviamente è ossidato.

## SALDATURA CON ARCO ELETTRICO

Esistono diversi tipi di saldatura con arco elettrico. In campo aeronautico quelle maggiormente utilizzate sono la saldatura "TIG", la saldatura "MIG" e la saldatura "plasma". Si vedrà prima una breve descrizione dei procedimenti e poi la loro applicabilità ai diversi materiali.

**Saldatura TIG.** La saldatura TIG, Tungsten Inert Gas, è una saldatura per fusione nella quale il calore necessario viene prodotto innescando un arco elettrico fra un elettrodo di tungsteno, che non si consuma durante la saldatura, ed il pezzo da saldare. L'area di saldatura viene protetta con un flusso di gas inerte, in modo da evitare il contatto fra metallo fuso e aria (ossigeno in modo particolare).

Questo tipo di saldatura si presta sia per saldature manuali sia per saldature completamente automatizzate. Poichè l'elettrodo non si consuma, la saldatura può essere effettuata semplicemente fondendo il materiale base, senza metallo d'apporto (come nella saldatura ossiacetilenica). Il materiale d'apporto, se necessario, viene aggiunto separatamente, sotto forma di bacchetta, nella saldatura manuale, o filo continuo, nella saldatura automatica. Come nella saldatura ossiacetilenica, piccoli spessori possono essere saldati senza preparazione dei giunti e senza metallo d'apporto, mentre spessori più elevati richiedono l'apertura di un cianfrino e conseguentemente l'aggiunta di un con metallo d'apporto per riempire il cianfrino.

La saldatura TIG può essere utilizzata in tutte le posizioni (da orizzontale, che è la più semplice, a rovescio, che è la più complicata), ed è particolarmente adatta per piccoli spessori in quasi tutti i materiali, esclusi quelli a basso punto di fusione. La corrente di saldatura può essere alternata o continua; nel caso di corrente continua si può saldare con polarità diretta o inversa. La corrente alternata fornisce buona penetrazione e riduce la formazione di ossidi; viene utilizzata per la saldatura di alluminio, magnesio e bronzi al berillio. Corrente continua e polarità diretta è il modo di saldatura TIG più comune; produce buoni risultati in quasi tutti i materiali; l'elettrodo è collegato al polo negativo e il pezzo a quello positivo. Poichè nella saldatura ad arco con corrente continua circa il 70% del calore viene generato al polo positivo, questa configurazione aumenta la capacità dell'elettrodo di sopportare corrente. Con questo tipo di alimentazione si ha la massima capacità di penetrazione e si ottengono buoni cordoni di saldatura; il principale inconveniente risiede nella non rimozione degli ossidi superficiali, per cui materiali come alluminio, magnesio e bronzi al berillio, devono essere trattati chimicamente o meccanicamente prima della saldatura, per rimuovere lo strato di ossido superficiale. L'esecuzione della saldatura comporta inoltre maggiori difficoltà che possono essere rimosse, almeno parzialmente, sovrapponendo alla corrente continua una corrente alternata ad alta frequenza. Saldando con corrente continua, polarità inversa, l'elettrodo è collegato al polo positivo e il pezzo al negativo. In questo modo si ha un forte riscaldamento dell'elettrodo e un minor riscaldamento del pezzo. La capacità di penetrazione è bassa e il cordone è molto largo. Saldare è molto difficile in questa configurazione, che viene utilizzata per saldature su leghe di magnesio in piccoli spessori. In alcuni casi un modo di saldatura pulsato, ottenuto facendo variare la corrente fra due valori prefissati, può migliorare notevolmente la saldatura. Come gas inerti vengono utilizzati argon, elio e miscele di questi; l'elio è un gas molto costoso rispetto all'argon, per cui si cerca di limitarne l'uso.

**Saldatura MIG.** La saldatura MIG, Metal Inert Gas, è una saldatura per fusione nella quale il calore necessario è generato da un arco elettrico che si innesca fra un elettrodo di materiale d'apporto, che si consuma durante la saldatura, ed il pezzo da saldare. Come nella saldatura TIG, l'area di saldatura viene protetta con un gas inerte. Il materiale d'apporto è un filo continuo di diametro compreso fra 0.8 e 3.2 mm, in funzione dello spessore da saldare. Il filo, movimentato da un apposito sistema di trascinamento, fuoriesce dalla pinza con una velocità tale da compensare la fusione del filo stesso e quindi mantenere costante la lunghezza dell'arco. Coassiale rispetto al filo esce dalla pinza anche il gas inerte di protezione.

La saldatura MIG può essere manuale, (la torcia viene movimentata dall'operatore), semi-automatica (l'operatore inizia la saldatura e segue poi lo svolgersi delle operazioni) o completamente automatica. Questo tipo di saldatura è stato inizialmente utilizzato per leghe di alluminio e leghe di magnesio, che non risultavano saldabili con altre tecniche. Oggi quasi tutti

i metalli possono essere convenientemente saldati con saldatura MIG; alcune leghe possono comunque richiedere particolari accorgimenti, quali ciclo di riscaldamento prima della saldatura, ciclo di raffreddamento dopo la saldatura, uso di particolari materiali d'apporto, controllo molto ristretto sul flusso del gas, uso di gas di copertura anche al rovescio per evitare il contatto del metallo molto caldo con l'atmosfera. Per quanto riguarda gli spessori saldabili, questi vanno da un minimo di circa 0.5 mm a un massimo che deriva da considerazioni economiche e non tecnologiche. Riassumendo, gli elementi essenziali per una saldatura MIG sono una tensione elettrica sufficientemente elevata per mantenere l'arco, corrente elettrica tale da fondere il materiale d'apporto, un sistema per l'avanzamento automatico del filo di materiale d'apporto e la pinza che porta l'elettrodo (filo continuo) e alla quale arrivano corrente elettrica e gas di protezione. La fig. 5 mostra lo schema di una apparecchiatura per saldatura MIG.

E' interessante approfondire la modalità di trasferimento del metallo nella saldatura MIG; tale modalità dipende dalla intensità di corrente:

- Spray. Il metallo viene trasferito sotto forma di piccole gocce fuse, fig. 6a; questo arco, che si ottiene con elevata densità di corrente e con argon come gas di protezione, è quello che fornisce la massima penetrazione e un'elevata velocità di deposizione. Quello spray è un modo di saldatura utilizzabile in qualunque posizione.
- Globulare. In questo arco, che si ottiene con corrente più bassa, si formano delle gocce di metallo fuso alla fine dell'elettrodo che cadono per gravità, fig. 6b. Ovviamente questo modo di saldatura è utilizzabile solo per saldature orizzontali.
- Corto circuito. In questo caso si ha una continua accensione e spegnimento dell'arco, fig. 6c-f. Questo modo di saldatura lo si ottiene con un valore preciso di corrente (relativamente basso) ed è particolarmente adatto per piccoli spessori, poichè produce meno calore rispetto agli altri tipi di arco. Anche con questo arco è possibile saldare in tutte le posizioni.
- Pulsato. E' un modo di trasferimento del metallo tipo spray, ma che avviene con pulsazioni regolari. Le pulsazioni si ottengono facendo variare la corrente fra due valori prefissati, con frequenze di 50 o 100 Hz.

La saldatura MIG può essere effettuata sia con corrente alternata che con corrente continua; nelle saldatrici è possibile regolare la tensione o la corrente. I gas utilizzati sono argon, elio o miscele di questi gas. Altre tecniche di saldatura simili alla MIG, ad esempio saldatura MAG, Metal Active Gas, utilizzano gas diversi quali ad esempio anidride carbonica oltre che elio e argon. L'aggiunta di anidride carbonica nella saldatura di alcuni acciai aumenta la capacità di penetrazione e la velocità di saldatura; in ogni caso l'anidride carbonica è economica rispetto ai gas inerti. Queste tecniche di saldatura non interessano il settore aeronautico.

**Saldatura con elettrodo rivestito.** Simile alla saldatura MIG è la saldatura con elettrodo rivestito. L'elettrodo in questo caso è una bacchetta rigida, lunghezza 30-50 cm, diametro 1.5-4 mm, in funzione dello spessore da saldare; l'elettrodo è protetto superficialmente con un materiale, di aspetto polverulento, che fonde insieme all'elettrodo, lasciando esposta solo la punta dell'elettrodo stesso. La fusione del rivestimento crea un'area protettiva che circonda il bagno di saldatura. Esistono diversi tipi di rivestimento per gli elettrodi, acido, basico, a base di cellulosa, a base di rutilio, da scegliersi in funzione del materiale da saldare e della posizione di saldatura (solo alcuni elettrodi possono essere utilizzati per saldature a rovescio). Il rivestimento dell'elettrodo lascia una scoria (slag) sul cordone di saldatura, fig. 7, che protegge il cordone dall'ambiente esterno durante il raffreddamento. Dopo il raffreddamento la scoria viene rimossa con martello e spazzola metallica.

La fig. 8 mostra alcune definizioni relative a saldature piane e d'angolo; i giunti rappresentati nella figura sono realizzati con elettrodo rivestito, ma le stesse saldature potrebbero essere realizzate anche con le altre tecniche descritte.

**Saldatura plasma.** La saldatura plasma è una saldatura ad arco che deriva dalla saldatura TIG e che si differenzia da quest'ultima per la presenza nella torcia di un vano (orifizio) che racchiude l'arco elettrico; in tale orifizio viene iniettato gas inerte. Per effetto della elevata temperatura, il gas si trasforma in un plasma costituito da una miscela di elettroni liberi, ioni positivi e atomi elettricamente neutri. Innescando un arco elettrico in una colonna di gas si

causa la parziale ionizzazione del gas; costringendo l'arco all'interno di un orifizio si ha un forte aumento della parte ionizzata. Il risultato finale è una temperatura dell'arco più elevata e una sorgente di calore più piccola. Nella fig. 9 sono mostrati gli schemi di un arco TIG e di un arco plasma; anche nell'arco plasma la zona fusa viene protetta con un flusso di gas inerte che circonda l'arco, fig. 9b. I vantaggi di questo tipo di saldatura sono:

Maggiore concentrazione della fonte di calore; maggior quantità di calore; alta velocità del plasma per effetto dell'espansione del gas; Minor sensibilità dell'arco alle variazioni di lunghezza; eliminazione della possibilità di contaminazione dell'elettrodo di tungsteno, che rappresenta uno dei possibili inconvenienti della saldatura TIG; minor difficoltà per la saldatura manuale;

mentre i principali svantaggi di questa tecnica di saldatura sono:

Maggior costo degli impianti; breve durata dell'orifizio; maggiori difficoltà nella saldatura; maggior consumo di gas.

Il principale vantaggio della saldatura plasma è comunque quello di consentire una tecnica di saldatura completamente diversa dalle precedenti, "keyhole", che è la tecnica utilizzata con sorgenti ad alta energia specifica, quali il laser e l'electron beam. L'arco plasma si presenta quasi cilindrico mentre l'arco TIG diverge rapidamente in un cono. La forma dell'arco, unitamente alla sua elevata energia e velocità, consentono di creare un foro passante in una piastra metallica fino a spessori di 12-14 mm. Creato il foro la torcia di saldatura viene spostata lungo l'interfaccia con una velocità tale da far solidificare il metallo fuso prima di cadere per gravità, fig. 10. Il vantaggio della saldatura plasma "keyhole" è quello di saldare spessori fino a 12-14 mm in un solo passaggio, senza richiedere l'apertura di un cianfrino. Per gli stessi spessori, con il processo TIG, sarebbe necessario creare un cianfrino e riempirlo poi con 3-4 passaggi. Nel saldatura keyhole il metallo fuso viene in contatto con il lato opposto delle piastre, dove la protezione di gas non è sufficiente. Per questo motivo è necessario creare una canalizzazione sul retro delle piastre che viene alimentata con ulteriore gas di protezione, fig. 11.

Qualunque sia la tecnica di saldatura utilizzata, le parti da saldare devono essere sostenute e correttamente riferite con apposite attrezzature (scalo di saldatura). Molto spesso le strutture vengono "imbastite" con piccoli punti di saldatura. Questa tecnica, per quanto molto diffusa, non è consigliabile; molti difetti di saldatura si trovano a posteriori proprio in corrispondenza dei punti di imbastitura. La fig. 12 mostra un esempio di scalo per la saldatura di testa di spezzoni di lamiera, al fine di produrre campioni per prove meccaniche.

La fig. 13 mostra le sezioni di cordoni di saldatura in piastre di 6 mm di spessore. Il cordone plasma è più piccolo del TIG, ma molto più grande del cordone electron beam (tecnica descritta in seguito).

La torcia plasma viene anche utilizzata come strumento per il taglio delle lamiere ed è molto più efficace del cannello ossi-acetilenico, sia per qualità che per la velocità di taglio. In questo caso l'arco viene innescato far l'elettrodo centrale e l'orifizio di costrizione (arco non trasferito al pezzo). Con la torcia plasma si possono tagliare materiali duri, quali ad esempio compositi a matrice metallica, altrimenti difficili da tagliare con altre tecniche. Le migliori torce da taglio hanno ugelli molto piccoli, HDPAC: High Definition Plasma Arc Cutting, tipicamente 0.3 mm invece dei 2-3 mm degli ugelli standard. Ciò migliora ulteriormente la qualità del taglio e riduce i problemi associati, quali eccessivo riscaldamento del materiale, zona termicamente alterata, tensioni residue.

**Saldatura ad arco delle leghe di alluminio.** L'alluminio ha una grande affinità per l'ossigeno, per cui si ricopre spontaneamente di una pellicola di ossido che fonde a temperatura alta. L'ossido si forma rapidamente ad alta temperatura, per cui è sempre necessario utilizzare un gas di protezione. Durante la solidificazione l'alluminio fuso si riduce in volume di circa il 6%, e questo causa sollecitazioni sul sistema di fissaggio. Le due tecniche di saldatura TIG e MIG hanno praticamente sostituito tutte le altre tecniche di saldatura per queste leghe. La visibilità durante la saldatura è molto buona poichè non si producono fumi. I migliori risultati si ottengono sulle leghe non trattabili termicamente, 1xxx, 3xxx e 5xxx; anche le leghe della serie 6xxx si saldano con facilità. Leghe ad alta resistenza, 2xxx e 7xxx sono saldabili, ma con qualche precauzione. In ogni caso, per ottenere buoni risultati, è necessaria una accurata

pulizia delle superfici prima della saldatura, unitamente alla asportazione dello strato di ossido superficiale, a meno di non accettare forti penalizzazioni nella resistenza del giunto.

Come gas di protezione si utilizza argon per spessori sottili, poichè produce un arco più freddo e più stabile rispetto all'elio che viceversa è preferibile per forti spessori, nei quali è necessaria una elevata velocità di deposizione. L'elio è più leggero dell'argon, e quindi è richiesta una maggior quantità di gas; inoltre è più costoso. Spesso vengono utilizzate miscele dei due gas. Piccole percentuali di ossigeno aggiunte al gas di protezione migliorano notevolmente la stabilità dell'arco, ma producono inclusioni di scaglie di ossido nel giunto.

Per quanto riguarda la saldatura MIG rispetto alla saldatura TIG, poichè l'elettrodo deve fondere durante la saldatura, è possibile utilizzare una densità di corrente più elevata, che nella saldatura TIG è limitata dalla fusione dell'elettrodo. Di conseguenza nella saldatura MIG si ha elevata velocità di deposizione, elevata velocità di saldatura, minor costo nella saldatura di forti spessori e minori distorsioni nei pezzi di forte spessore.

La saldatura TIG delle leghe di alluminio è caratterizzata da costi minori nella saldatura di piccoli spessori, possibilità di saldare spessori molto sottili, fino a 0.2 mm, possibilità di saldare senza metallo d'apporto (il cordone ottenuto per sola fusione è più regolare) ed un'eccellente qualità di saldatura.

Piccoli spessori, da 1.5 a 3 mm, possono essere saldati TIG senza preparazione dei lembi; spessori maggiori richiedono la preparazione dei lembi e uno scostamento iniziale del giunto. Velocità di saldatura tipiche sono dell'ordine di 100 mm/min.

Con la saldatura MIG è possibile saldare lamiere fino a 6 mm senza preparazione dei bordi; per spessori superiori è necessaria la preparazione dei lembi e l'apertura del giunto. Se questa è molto forte il metallo fuso tende a cadere per cui è necessario sostenerlo con una lamiera in acciaio inossidabile, in materiale ceramico o semplicemente in alluminio, (backing).

Velocità di saldatura tipiche sono dell'ordine di 500 mm/min.

**Saldatura ad arco delle leghe di magnesio.** Le leghe di magnesio possono essere saldate TIG e MIG; la saldabilità dipende fortemente dal tipo di lega. Nelle leghe magnesio-alluminio-zinco (AZ31B, AZ61A ...) l'elevato contenuto di alluminio favorisce la saldatura, mentre le leghe contenenti un alto tenore di zinco (ZH62A, ZK51A ..) si cricciano facilmente durante il raffreddamento. La saldatura più utilizzata è la TIG.

**Saldatura ad arco delle leghe di titanio.** Le leghe di titanio sono facilmente saldabili TIG, MIG e plasma. La saldatura TIG è quella maggiormente utilizzata. La saldatura plasma è comunque più veloce e può essere vantaggiosamente utilizzata per forti spessori. Anche la saldatura MIG è utilizzata per forti spessori ed ha un minor costo rispetto alla saldatura TIG. Il titanio è estremamente reattivo nei confronti dell'ossigeno, per cui è fondamentale la corretta regolazione del gas di protezione. Per questo motivo, in alcuni casi, si preferisce saldare in una camera ad atmosfera controllata, fig. 14, alla quale l'operatore accede attraverso aperture dotate di guanti.

**Un esempio di componente aeronautico saldato.** Alcuni velivoli presentano saldature anche in componenti critici. Un esempio tipico è quello del Mirage F1, nel quale sono presenti alcune saldature nella zona di attacco dell'ala alla fusoliera, fig. 15. L'attacco, in acciaio "maraging", è costituito da cinque sottocomponenti. Il peso di questi elementi prima delle lavorazioni alle macchine utensili è di 437 Kg e si riduce dopo le lavorazioni a 135 Kg. La sezionatura dell'attacco in più parti ha consentito la lavorazione delle parti interne. Il componente finito pesa 105 Kg. L'attacco viene imbastito con saldatura TIG manuale, fig. 16, e poi saldato TIG in modo automatico, fig. 17. Il numero di passate dipende dallo spessore locale e varia da 11 a 13 su 16 mm di spessore a 5-6 su 6.5 mm di spessore. L'intero ciclo di saldatura, compresi i tempi di raffreddamento dopo ogni passata, richiede 2.5 giorni. Dopo la saldatura viene effettuato un controllo con raggi X; eventuali difetti vengono riparati con saldatura TIG manuale. Segue un trattamento termico di distensione di tensioni residue, effettuato a 800 °C, prima della lavorazione finale alle macchine utensili.

**Saldatura per resistenza.** Questo procedimento, classico dell'industria automobilistica, non è molto utilizzato in campo aeronautico, poiché un punto di saldatura (nugget) ha una resistenza più bassa di quella di un rivetto di pari diametro. E' comunque una tecnologia interessante ed economica rispetto ad esempio alla chiodatura. Tutti i materiali metallici possono essere saldati per resistenza. La saldatrice per punti è dotata di una pinza, costituita da due elettrodi, con la quale si serrano le due lamiere. A questo punto si ha passaggio di corrente attraverso gli elettrodi con conseguente riscaldamento delle lamiere fino a creare una zona fusa. La giunzione avviene in pochissimo tempo (~0.1 sec), per cui il tempo maggiore è quello necessario per il posizionamento degli elettrodi. La tecnica può essere completamente automatizzata.

Per ottenere una buona saldatura nelle leghe di alluminio è necessaria la preventiva asportazione dello strato di ossido superficiale, anche perchè lo strato di ossido aumenta molto la resistenza elettrica del contatto. La fig. 18 mostra la sezione di un punto saldatura in un acciaio inox, AISI 301 LN. Al centro si ha una zona equiassica, circondata da una struttura dendritica. Netto è il passaggio dal chiodo di saldatura al metallo base. Nel Mirage F1 la saldatura per punti è stata utilizzata per collegare irrigidimenti e rivestimento in alcuni pannelli di fusoliera, fig. 19; nel velivolo sono complessivamente presenti 8900 punti di saldatura. A parte questo esempio quasi limite, la saldatura per resistenza viene utilizzata in aeronautica per l'unione di elementi non primari, ad esempio per l'assemblaggio di piccoli portelli (G91).

Una variante della saldatura per punti è quella realizzata con due elettrodi ruotanti; in questo modo si ottiene un cordone di saldatura continuo, necessario ad esempio per la saldatura dei serbatoi.

### **Saldatura con fascio di elettroni (electron beam welding),**

La saldatura con fascio di elettroni, EBW, è una tecnica molto interessante, essendo applicabile anche a materiali altrimenti difficili da saldare, quali le leghe di alluminio ad alta resistenza e superleghe base nickel e base cobalto.

La fig. 21 mostra lo schema di una apparecchiatura: gli elettroni (1) vengono generati riscaldando a temperatura superiore a 2000 °C un filamento di tungsteno o di tantalio (2); gli elettroni emessi vengono raggruppati, modellati in un fascio e accelerati da una elevata differenza di potenziale fra il filamento (catodo) e l'anodo (3). Dimensionando opportunamente il catodo e l'anodo, gli elettroni passano attraverso il foro dell'anodo ed iniziano a divergere; il fascio viene focalizzato sul pezzo con una lente magnetica (4). Se necessario, il fascio può essere deviato con spire magnetiche. Al momento dell'impatto con il pezzo, l'energia cinetica degli elettroni viene trasformata in calore. La saldatura EB deve essere necessariamente effettuata sotto vuoto per:

- evitare la dispersione del fascio prodotta dalla collisione con le molecole di aria;
- prevenire la formazione di scariche elettriche fra l'anodo e il catodo, favorite dalla produzione di vapori metallici durante la saldatura;
- evitare la contaminazione dell'ossigeno nella saldatura;
- proteggere i componenti del cannone, particolarmente il catodo, dalla ossidazione.

Il fascio viene focalizzato a 0.2-0.5 mm di diametro; la densità di potenza, dell'ordine di 1500 watt/mm<sup>2</sup>, è sufficiente per vaporizzare qualunque metallo. Puntando il fascio sul pezzo da saldare, si produce un foro; la saldatura procede con la tecnica del keyhole. La saldatura EB può essere utilizzata per tutti i metalli saldabili ad arco; la qualità che si ottiene è quasi sempre superiore, o al limite uguale, a quella ottenibile con gli altri processi di saldatura ad arco.

I vantaggi di questo tipo di saldatura risiedono in:

- maggiore capacità di penetrazione e cordone di saldatura più stretto rispetto alla saldatura TIG. La quantità di calore totale necessaria per effettuare una saldatura EB è inferiore rispetto alla saldatura TIG, e questo implica minori distorsioni del pezzo, minor ritiro durante il raffreddamento, fig. 22, raffreddamento più veloce con conseguente formazione di una grana

più fine, possibilità di saldare materiali ad elevata resistenza senza apprezzabili deterioramenti di proprietà meccaniche, possibilità di saldare componenti già lavorati per l'assemblaggio finale, possibilità di saldare in prossimità di elementi sensibili ad riscaldamento, saldare metalli refrattari o reattivi;

- miglior controllo della penetrazione e della geometria del cordone di saldatura;
- assenza di ossidi, essendo la saldatura effettuata sotto vuoto;
- velocità di saldatura elevata.

Operando sotto vuoto è possibile aumentare la distanza fra cannone elettronico e pezzo, fino a distanze dell'ordine di 1 metro, facilitando in questo modo la saldatura di parti poco accessibili e consentendo l'osservazione della saldatura tramite un cannocchiale. Su alcuni materiali si ottengono comunque buone saldature EB anche utilizzando una semplice protezione di gas inerte. In questo caso si ha una notevole riduzione della capacità di penetrazione del fascio (circa 10 mm) e deve essere minimizzata la distanza fra cannone e pezzo da saldare (< 20 mm). La collisione fra elettroni accelerati e molecole di gas produce raggi X, con conseguenti problemi di sicurezza per gli addetti.

I principali svantaggi dell'EBW sono:

- elevato costo degli impianti;
- limitazioni sulla geometria dei componenti imposte dalle dimensioni della camera a vuoto;
- elevati tempi morti di pompaggio della camera a vuoto (anche 30'), con conseguente bassa produttività;
- costi elevati degli scali di saldatura e costi elevati per la preparazione accurata dei lembi da saldare. Poichè il fascio ha dimensioni molto ridotte, gli scostamenti ammissibili fra i due lembi da saldare sono dell'ordine di 0.05-0.1 mm.

Il processo EBW è influenzato da diversi parametri, che devono essere regolati per ottenere una buona saldatura:

- tensione di accelerazione del fascio,
- corrente,
- velocità di saldatura,
- corrente di focalizzazione,
- distanza fra cannone e pezzo,

Questi parametri devono essere ottimizzati per ottenere una buona saldatura su un certo materiale di un certo spessore. Risulta quindi molto difficile saldare elementi a spessore variabile. Aumentando la tensione di accelerazione e la corrente si ha una maggior potenza del fascio, e quindi una maggior penetrazione. Aumentando la velocità di saldatura si ha una diminuzione di penetrazione.

I pezzi da saldare devono essere accuratamente puliti, in modo meccanico o chimico, prima della saldatura. Una preparazione inadeguata può produrre difetti di saldatura e problemi per la pompa a vuoto. Questa preparazione è un ulteriore fattore di costo della saldatura EB. Le tolleranze per gli scali di saldatura sono molto ristrette; in compenso le forze esercitate dal componente saldato durante il raffreddamento sono più basse rispetto ad esempio alla saldatura TIG. Pezzi e attrezzi costruiti in materiali magnetici devono essere demagnetizzati prima della saldatura, poichè anche un piccolo magnetismo residuo potrebbe causare la deflessione del fascio. Per materiali ad elevata resistenza e forti spessori può essere necessaria una fase di riscaldamento prima della saldatura e una fase di raffreddamento lento dopo la saldatura, per evitare la formazione di cricche prodotte da tensioni di origine termica. Queste operazioni aumentano i tempi, e quindi i costi, di saldatura.

I due punti di inizio e fine saldatura possono presentare dei difetti; è quindi opportuno saldare in modo continuo, prevedendo dei talloni di inizio e fine saldatura, da asportare successivamente. Una possibilità alternativa, particolarmente interessante per cordoni che si chiudono su se stessi, come nel caso di saldature circolari in serbatoi in pressione, è

quella di programmare la macchina in modo da iniziare e concludere la saldatura con una variazione della corrente.

Con EB è possibile saldare sia piccoli spessori, fino anche a 0.02 mm, che forti spessori. Ad esempio con una fascio di 9 kw ed alto vuoto si ottiene capacità di penetrazione su acciaio di circa 100 mm. Una ulteriore possibilità della saldatura EB è quella di poter effettuare saldature multiple; un esempio è mostrato in fig. 23.

Il cordone di saldatura EB si presenta molto piccolo e per questo motivo è necessario un accurato posizionamento dei due elementi che devono essere saldati; in alcuni casi è necessario introdurre piccoli movimenti laterali del fascio (spinning), ottenuti deviando il fascio in modo magnetico, fig. 24, poichè piccoli disallineamenti porterebbero alla fusione di uno solo dei due elementi. Lo spinning viene anche utilizzato per aumentare il riscaldamento del pezzo, ad esempio se questo è costruito con un materiale fragile. Lo stesso risultato lo si può ottenere con un fascio più largo, cioè non perfettamente focalizzato. Su spessori molto piccoli lo spinning può causare undercut, fig. 25.

La fig. 26 mostra alcuni esempi di cordoni EB, mentre la fig. 27 mostra il confronto fra un cordone EB e un cordone TIG con ripresa al rovescio su una piastra di 1" di spessore. La fig. 28 mostra un esempio di cordone ottenuto con fascio inclinato (si tratta di una saldatura laser, ma potrebbe essere ottenuta anche con EB). Saldature di questo tipo non sono realizzabili con le tecniche descritte precedentemente..

La saldatura EB viene generalmente eseguita senza materiale d'apporto; in alcuni casi può comunque essere utilizzato un materiale d'apporto per ridurre la porosità del cordone che caratterizza la saldatura EB in alcuni materiali o per interporre nel giunto un materiale a minor resistenza, al fine di evitare cricature nel cordone.

La saldatura EB viene quasi sempre eseguita in modo completamente automatico; è comunque necessario posizionare il fascio sul pezzo ed è opportuno osservare la saldatura durante l'esecuzione.

Per quanto riguarda i materiali saldabili con EB, oltre i materiali comuni come acciai, leghe leggere, leghe di magnesio, leghe di titanio, è possibile saldare superleghe per alte temperature, come superleghe base cromo, superleghe base nickel, superleghe base cobalto, acciai da utensili senza produrre ricotture, metalli refrattari come tungsteno, molibdeno, colombo, tantalio ed anche metalli diversi, altrimenti difficilmente saldabili o non saldabili con altre tecniche, come acciaio-rame, acciaio-argento, argento-alluminio, acciaio inossidabile-superlega. Le velocità di saldatura variano fra 0.5 e 5 m/min.

Un'altra interessante applicazione dell'EBW è la riparazione di cricche prodotte da cause diverse in un componente (fatica o cricche da ritiro durante la fabbricazione); un esempio è mostrato in fig. 29.

La saldatura EB è stata utilizzata per la costruzione del pianetto centrale dell'ala del TORNADO, fig. 30. Il componente è formato da otto elementi, in Ti-6Al-4V, ottenuti per lavorazione alle macchine utensili o stampaggio. Il rivestimento superiore della struttura è imbullonato per consentire la successiva lavorazione dei cordoni di saldatura interni e per problemi di ispezione. Le saldature sono state effettuate in una camera a vuoto; con una tensione di 30 kV è possibile saldare spessori di titanio fino a 70 mm con una sola passata. La fig. 31 mostra una foto e uno schema della camera a vuoto; i tempi necessari per il pompaggio di una camera di queste dimensioni sono dell'ordine di 20-30 minuti.

Anche l'F-14 ha il pianetto centrale in lega di titanio, saldata EB, fig. 32. Le saldatrici attualmente disponibili consentono saldature su acciaio fino a spessori di 150 mm con un solo passaggio, fig. 33.

**Saldatura laser.** Questo tipo di saldatura utilizza un fascio laser per riscaldare e fondere localmente un metallo. La profondità di penetrazione è inferiore rispetto alla saldatura EB, ma l'aspetto più interessante di questo processo è quello di poter operare in qualunque tipo di atmosfera. Come nel caso della saldatura EB, si hanno cordoni molto piccoli, limitando in questo modo il riscaldamento dei componenti, al punto che si è utilizzata la saldatura laser per calettare ruote dentate su alberi o per costruire riduttori con carter saldato (ovviamente si perde la possibilità di interventi di manutenzione, ma si ottiene un riduttore più economico e più rigido).

Recentemente è molto aumentato l'interesse, anche in campo aeronautico, per la saldatura laser delle leghe di alluminio. Un laser allo stato solido è tipicamente formato da un



cristallo di rubino avente una lunghezza di 50 mm e un diametro di 6 mm, "dopato" con triossido di cromo. Le due estremità del cristallo devono essere parallele e accuratamente spianate, in modo da formare una cavità ottica. Il cristallo è circondato da un tubo elicoidale in quarzo contenente xenon, fig. 34; l'apparecchiatura è montata all'interno di un cilindro altamente riflettente. Tramite un condensatore elettrico di alta capacità si produce una scarica elettrica nel gas. L'impulso luminoso viene raccolto dal laser e emesso sotto forma di luce altamente direzionale e parallela. Questa luce è di colore rosso con lunghezza d'onda 0.6929-0.6943  $\mu\text{m}$ . L'emissione di ciascun fotone avviene in un tempo finito, durante il quale l'emissione aumenta fino ad un massimo per poi decadere a zero. Un altro importante gruppo di laser allo stato solido è quello degli Nd-YAG (Neodymium-yttrium aluminium garnet), che emettono luce nell'infrarosso (1.064  $\mu\text{m}$ ), fig. 36. Questi laser possono essere "pulsati" fino a 300 Hz, ottenendo una potenza massima di uscita dell'ordine di 800 Watt. Potenze ancora maggiori possono ottenere con i laser che utilizzano un cristallo di bario. Questi laser hanno potenze istantanee molto elevate ma pulsazioni molto brevi e, per la scarsa conduttività termica del cristallo, sono utilizzabili solo in modo intermittente.

Una diversa categoria di laser utilizza un gas (gas laser) invece di un cristallo (solid state laser). I gas più utilizzati sono biossido di carbonio (10.6  $\mu\text{m}$ ), elio-neon (0.63  $\mu\text{m}$ ), elio-cadmio (0.442  $\mu\text{m}$ ). Un laser contenente dieci parti di elio e una di neon ha una intensità minore rispetto ai laser solidi, ma funziona in modo continuativo (non pulsato). Questi laser hanno comunque potenze basse e vengono utilizzati come sistemi di allineamento., mentre i laser con biossido di carbonio possono sviluppare potenze continue fino a 40 KW, per cui sono utilizzabili per il taglio e la saldatura dei metalli.

Il principale vantaggio della saldatura laser rispetto alla saldatura EB è quello di poter operare in qualunque ambiente e non necessariamente in camera a vuoto. Non si ha sviluppo di raggi X ma è comunque richiesta protezione per gli occhi, la pelle e per i vapori. Come detto precedentemente, la capacità di penetrazione è inferiore rispetto all'EB. Attualmente molte aziende aeronautiche stanno studiando possibili applicazioni della saldatura laser per l'unione irrigidimenti-rivestimento in aree di fusoliera non critiche a fatica (ventre). Il laser può essere utilizzato anche come tecnica di taglio delle lamiere, e per produrre fori molto profondi.

**Friction stir welding.** Friction stir welding (FSW) è una nuova tecnica di saldatura che permette di applicare i vantaggi di una saldatura in fase solida, tipici delle saldature per attrito, al caso di saldature di testa di lamiere. La saldatura per attrito è una tecnica utilizzata da molto tempo per saldare di testa elementi circolari; il vantaggio di una saldatura in fase solida è quello di non esporre all'ambiente il metallo liquido, non esistendo liquido in questo tipo di saldatura. In questo modo si riduce, anche se non si elimina, la possibilità di contaminazione della saldatura. Per attrito vengono saldati piccoli elementi (si è visto il caso dei rivetti in titanio formati da titanio puro e lega di titanio) fino a elementi di grandi dimensioni, quali le testate filettate delle aste per perforazioni. Nella FSW si applicano questi vantaggi al caso della saldatura delle lamiere; le due lamiere vengono mantenute in posizione corretta tramite un apposito sistema di fissaggio. La saldatura si realizza facendo passare lungo la giunzione un perno ruotante lungo quasi quanto lo spessore da saldare. Il calore prodotto per attrito nel contatto perno-lamiere produce una zona plasticizzata intorno al perno, il quale, avanzando, rimuove il metallo anteriormente e lo sposta posteriormente (il processo è molto simile ad una estrusione). Attualmente è possibile saldare in questo modo le leghe leggere; un utensile ha una durata di circa 1000 m di saldatura. Per acciaio e titanio la saldatura è possibile ma l'utensile si usura in circa 50 cm di saldatura.

La fig. 37 mostra uno schema del processo; per aumentare la quantità di calore prodotto per attrito, il perno presenta uno spallamento che striscia sulla superficie. La fig. 38 mostra la sezione di un giunto ottenuto con FSW; sono appena visibili nel nugget le "onion rings" tipiche di questo tipo di saldatura. La fig. 39 mostra alcuni esempi di giunti FSW.

I vantaggi della saldatura FSW sono molteplici:

- La giunzione in fase solida elimina le criccate spesso associate ai processi di saldatura per fusione di leghe difficilmente saldabili (la definizione di lega difficilmente saldabile in molti casi è associata alla formazione di cricche da ritiro).
- La concentrazione di elementi alliganti rimane costante, mentre nelle saldature per fusione è possibile l'evaporazione del metallo fuso.

- Formazione di una grana molto fine.
- Basso consumo di energia.
- Possibilità di saldare con una sola passata spessori fino a 40÷50 mm di alluminio (100 mm con due passaggi, fig. 40).
- Non sono richiesti metallo d'apporto, preparazione dei giunti e gas di protezione.
- Assenza di porosità.
- Possibilità (in realtà necessità) di automazione.

Mentre gli svantaggi principali sono:

- Necessità di messa a punto del processo per ogni materiale ed ogni spessore
- Un sistema di fissaggio molto rigido; in genere si utilizzano fresatrici, appositamente modificate per avere elevate velocità di rotazione dell'utensile, per bloccare i pezzi e eseguire la saldatura.
- Presenza di un foro nel punto in cui l'utensile esce (speciali utensili con perno retrattile possono chiudere il foro finale).
- Impossibilità (attuale) di disporre di attrezzature portatili.

La FSW è un processo di saldatura ancora in fase di sviluppo. Le fig. 41 e 42 mostrano due saldatrici FSW, specificatamente costruite per la saldatura di serbatoi di impiego spaziale.

### **Brasatura**

La brasatura è una tecnica di giunzione fra metalli che si basa sulla adesione del materiale d'apporto al metallo base. In campo aeronautico questa tecnica è poco utilizzata, anche perchè il disegno delle strutture e i materiali utilizzati non si prestano per questo tipo di giunzione. La brasatura tipicamente viene effettuata sugli acciai e in questi materiali si ottengono i migliori risultati. Il vantaggio della brasatura rispetto alla saldatura è quello di essere effettuata a temperature più basse, quindi con minor problemi di deformazioni negli elementi collegati. Come per l'incollaggio, per effettuare una brasatura è necessaria una zona di sovrapposizione abbastanza ampia, poichè la resistenza meccanica del materiale di apporto è bassa. Brasature di qualità aeronautica si ottengono in forno in atmosfera inerte oppure sotto vuoto; spesso è necessario costruire uno scalo che mantiene i vari elementi nella posizione corretta durante la brasatura. La fig. 43 mostra un esempio di struttura aeronautica brasata; il componente è una pala di elica ottenuta brasando con rame due semigusci in acciaio 4350. Prima della brasatura, le superfici di contatto sono state preparate con una spruzzatura a caldo di rame. Anche le leghe leggere possono essere collegate con brasatura, utilizzando come materiale d'apporto una lega di alluminio a punto di fusione relativamente basso, tipicamente leghe contenenti il 7-12% di silicio. Un esempio di brasatura di alluminio è mostrato in fig. 44. La resistenza di questi giunti è relativamente bassa e non esistono esempi di applicazioni in campo aeronautico.

Tratto da:

---- "Advanced Joining of Aerospace Metallic Materials", AGARD CP 398.

---- "Welding and brazing" Metal Handbook n.6, American Society for Metals.

D.F.Horne "Aircraft Production Technology" Cambridge University Press, 1986.

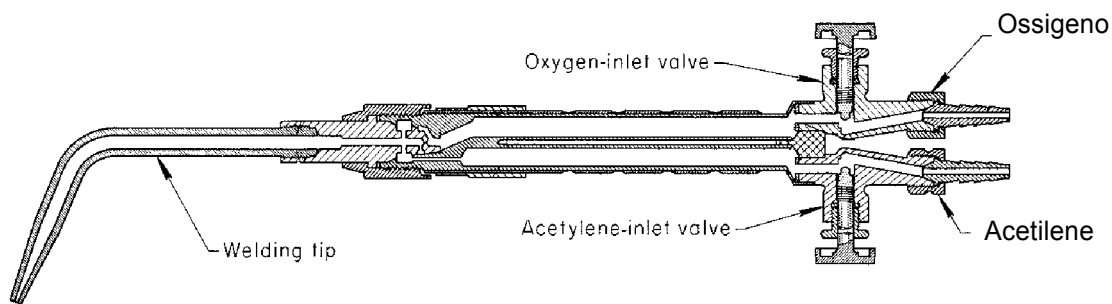


Fig. 1 - Cannello ossiacetilenico.

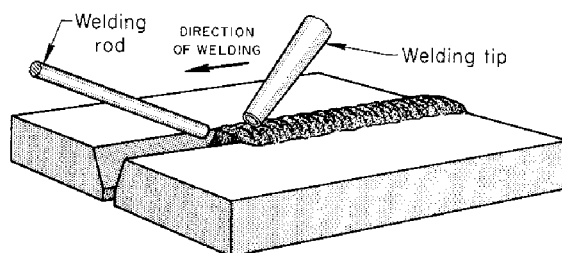


Fig. 2 Saldatura ossiacetilenica.

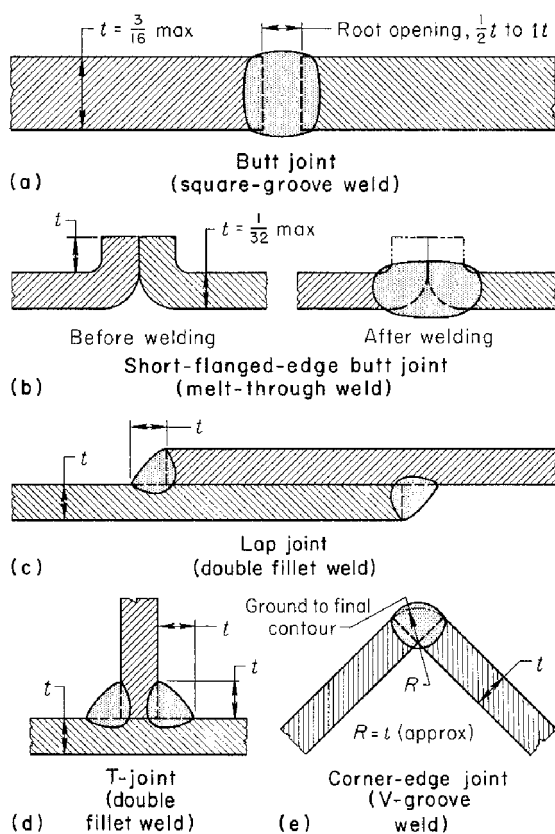


Fig. 3 - Giunti realizzabili senza preparazione dei bordi.

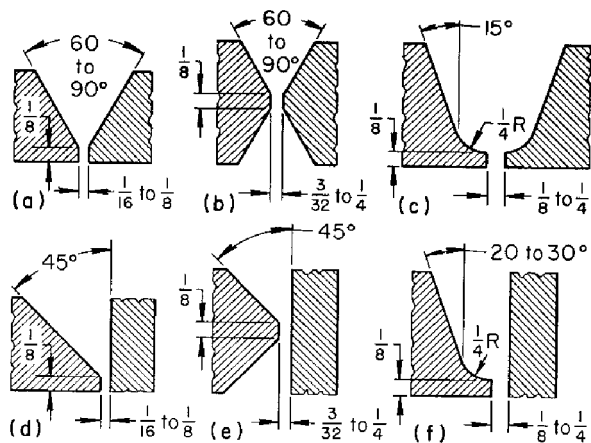


Fig. 4 - Preparazione dei bordi (cianfrino) per la saldatura di grandi spessori.

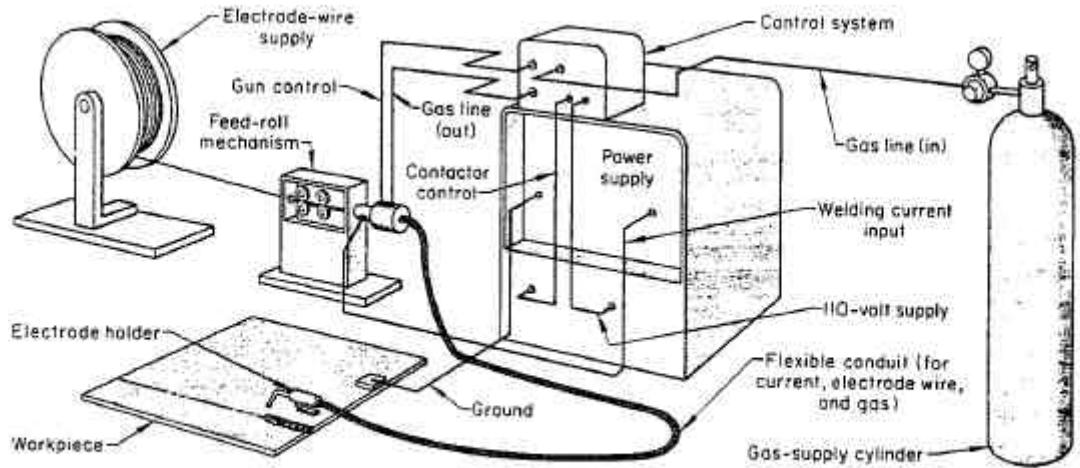


Fig. 5 - Impianto per saldatura MIG.

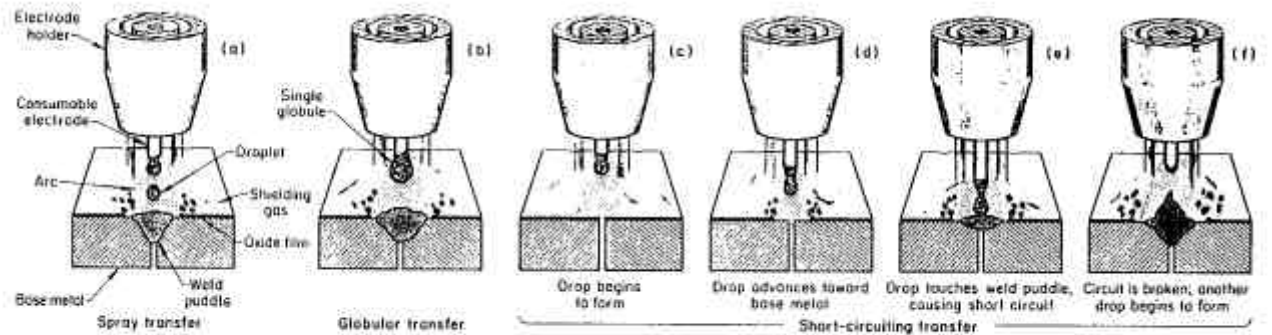


Fig. 6 - Trasferimento di metallo nella saldatura MIG; spray (a), globulare (b) e corto circuito (c).

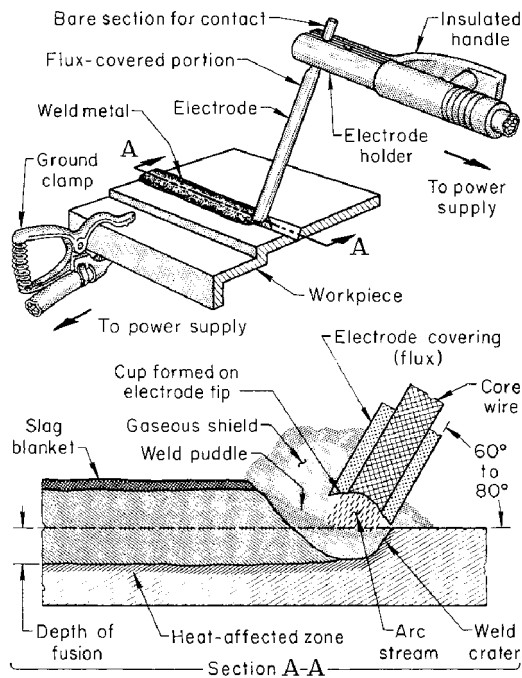


Fig. 7 - Saldatura elettrica con elettrodo rivestito.

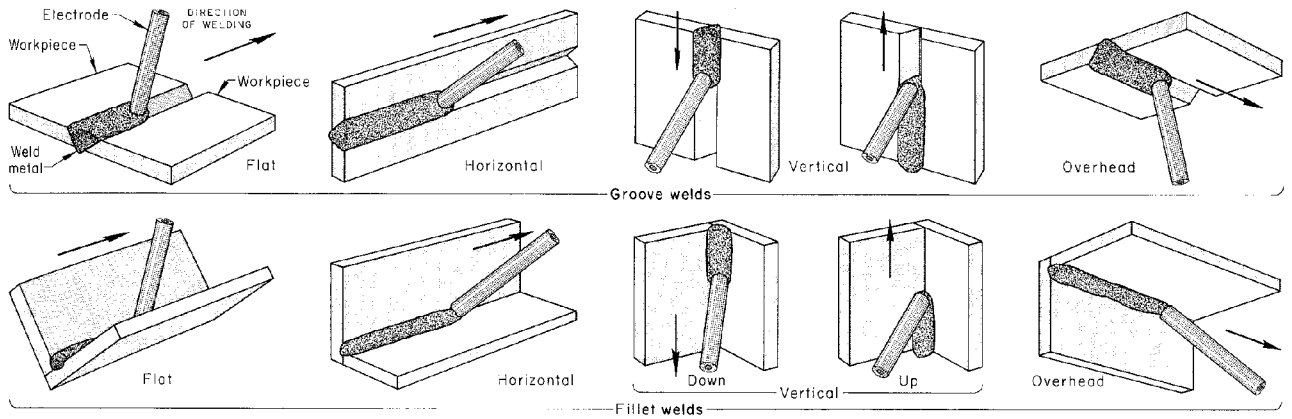


Fig. 8 - Giunti saldati con elettrodo rivestito.

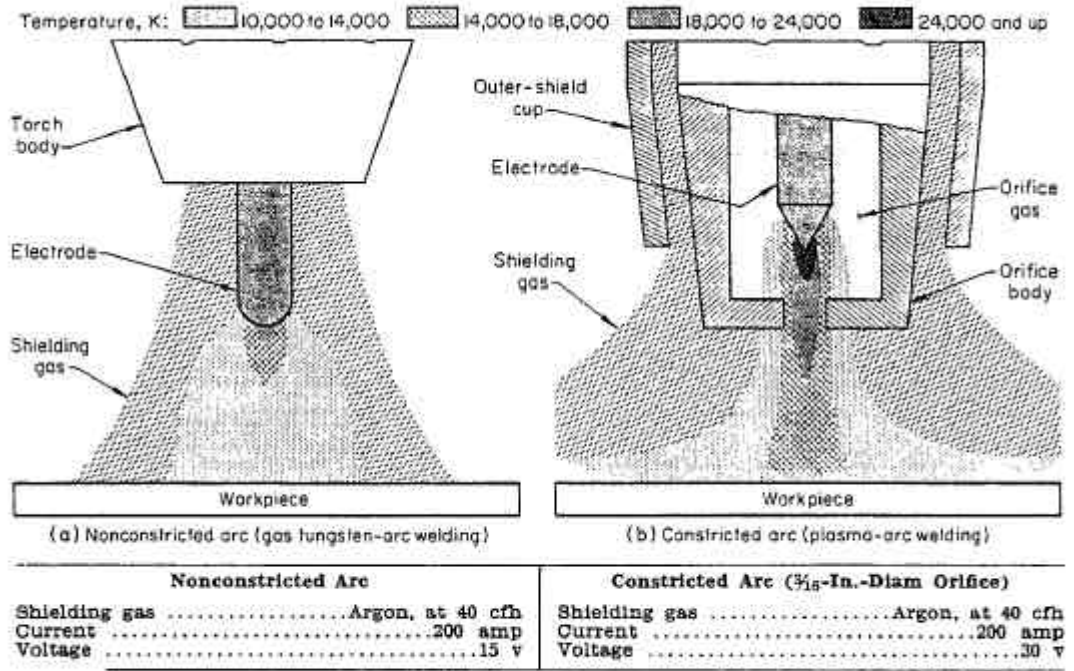


Fig. 9 - Torcia TIG (sinistra) e torcia plasma (destra).

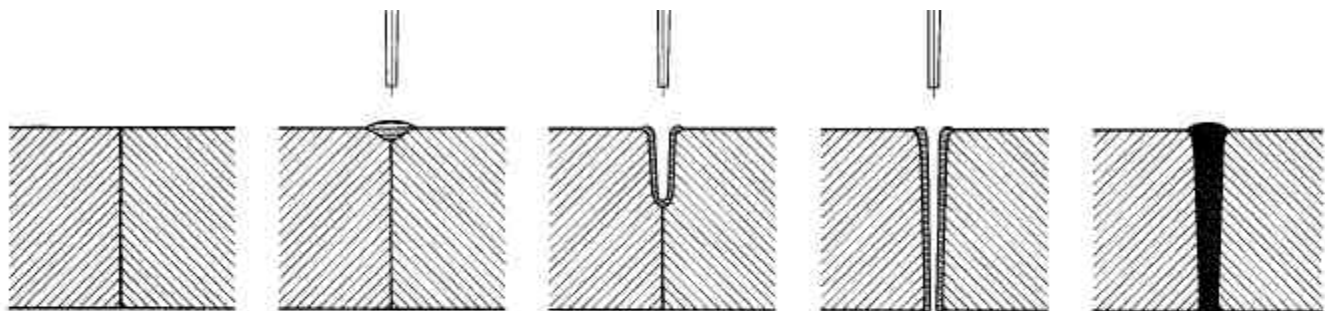


Fig. 10 - Formazione del "keyhole".

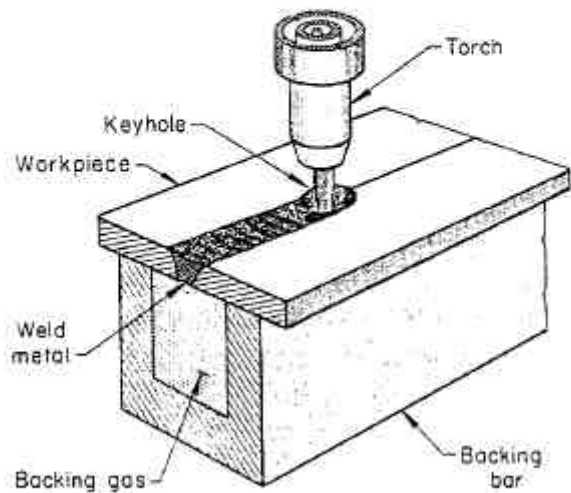
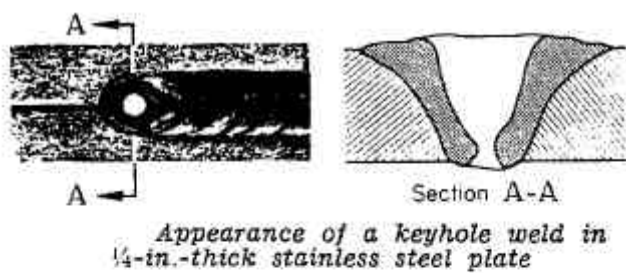


Fig. 11 - Saldatura con la tecnica del "keyhole".

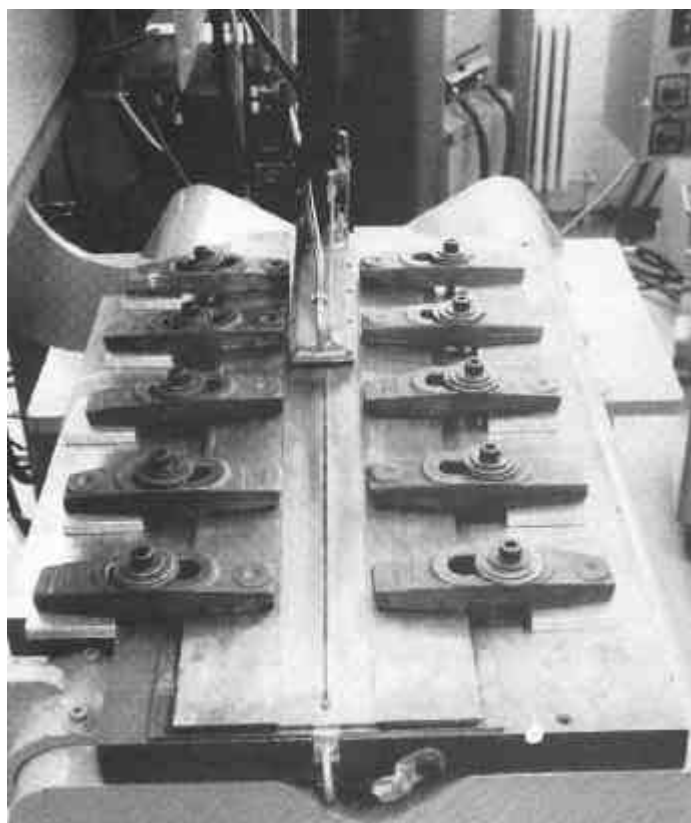
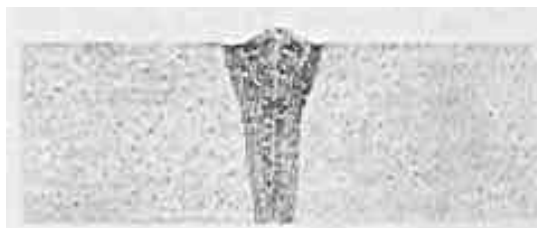


Fig. 12 - Esempio di scalo di saldatura per lamiera.



Electron beam welding



Plasma arc welding (Keyhole technique)



Gas tungsten-arc

Fig. 13 - Cordoni electron beam, plasma e TIG in piastre di 6 mm di spessore.

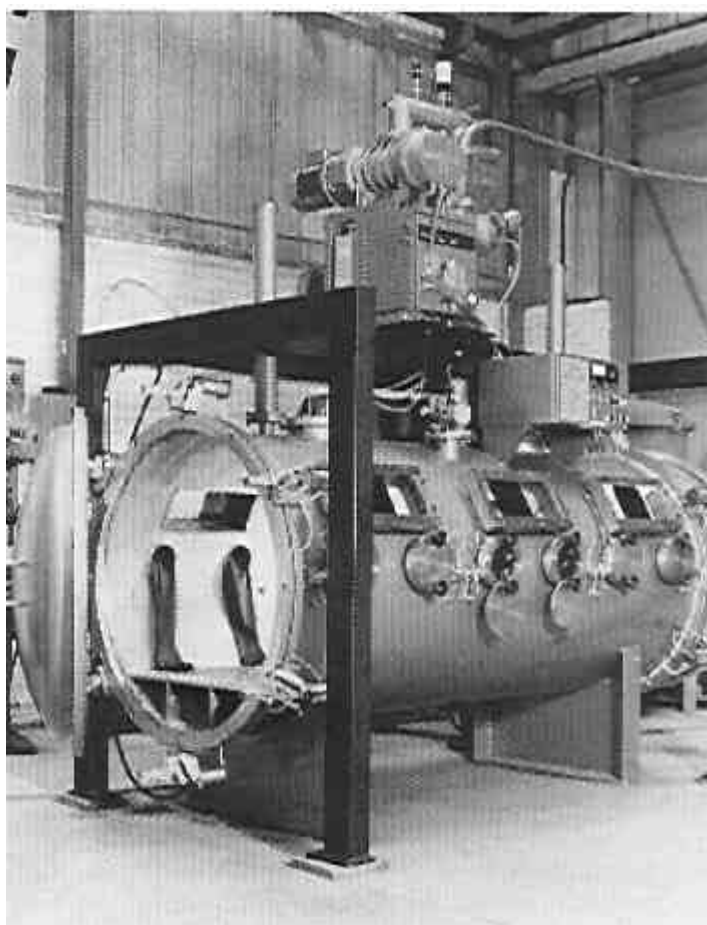


Fig. 14 - Camera Consarc per saldatura in atmosfera inerte.

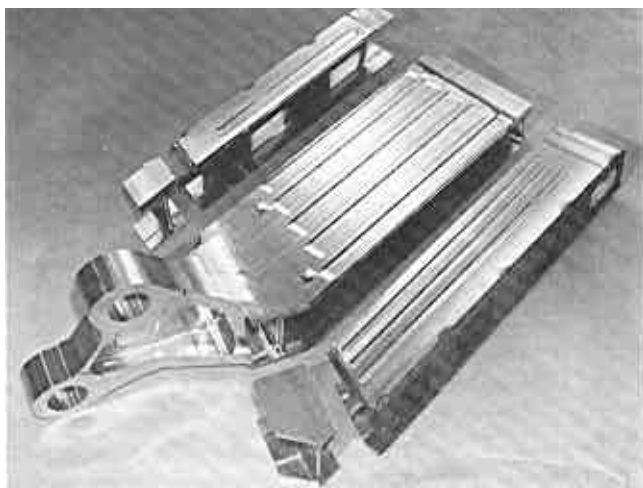


Fig. 15 - Main wing attachment on Mirage F1 in rough machined condition ready for TIG welding.



Fig. 16 - Steel wing attachment fittings accurately mounted in welding fixture.

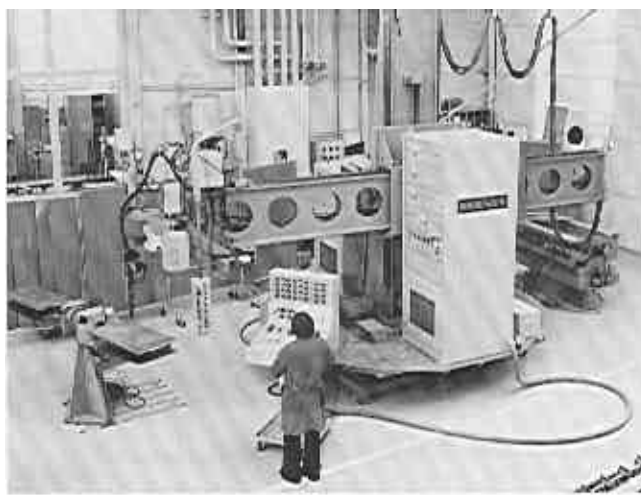


Fig. 17- Automatic TIG welding using pulsed current by Type 612 Sciaky machine.



Fig. 18 - Sezione metallografica di un punto di saldatura. Materiale AISI 301 LN, spessore 2 mm.



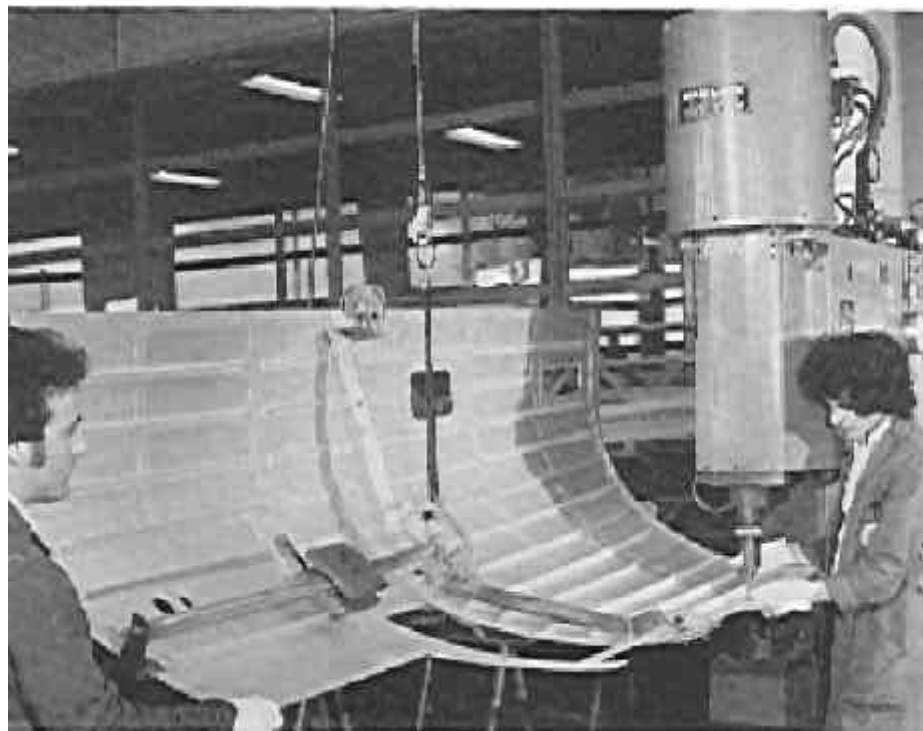


Fig. 19 - Forward lateral skin panel on Mirage F1 aircraft which have 1100 spot welds to assemble stringers onto the chemically milled panel.

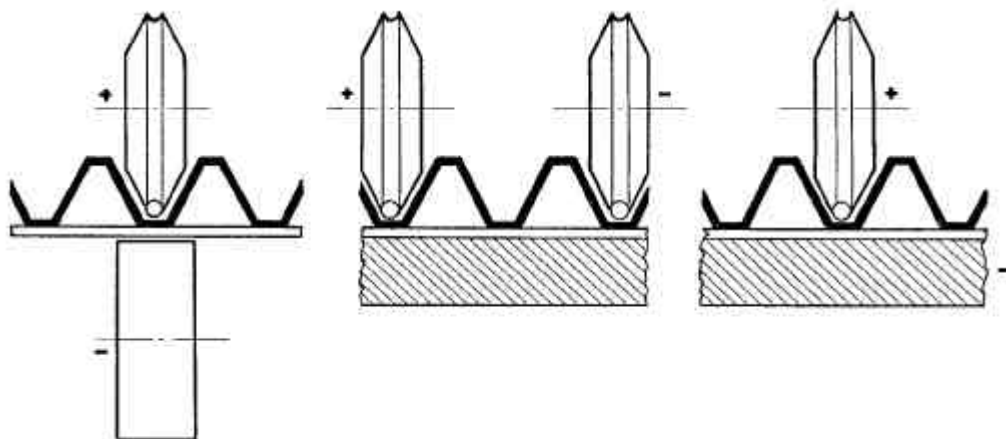


Fig. 20 - Possibili configurazioni nella saldatura con rulli.

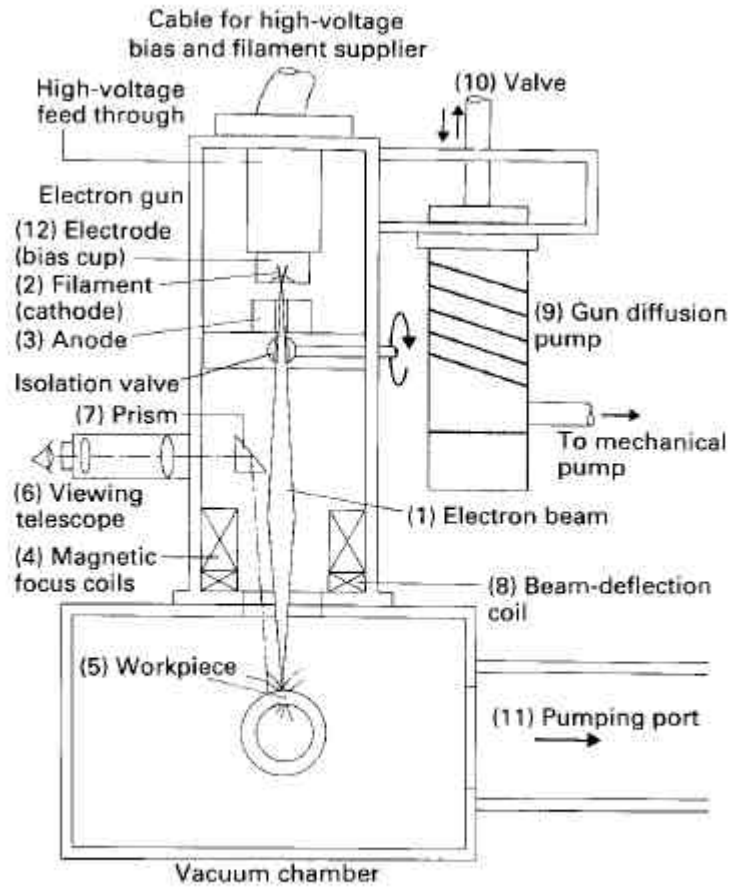


Fig. 21 - Rappresentazione schematica di una saldatrice electron beam.

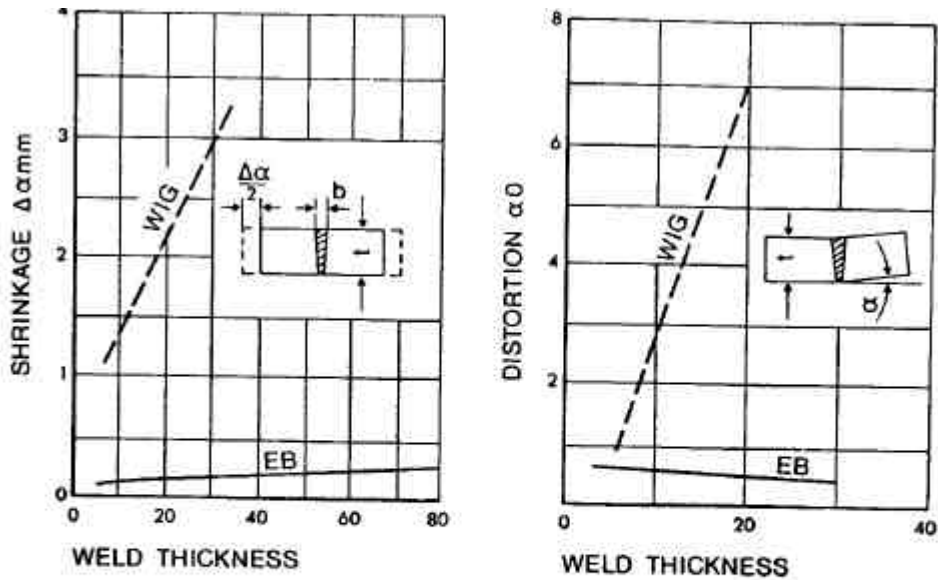


Fig. 22 - Influenza del processo di saldatura sul ritiro e sulla distorsione di un giunto saldato.

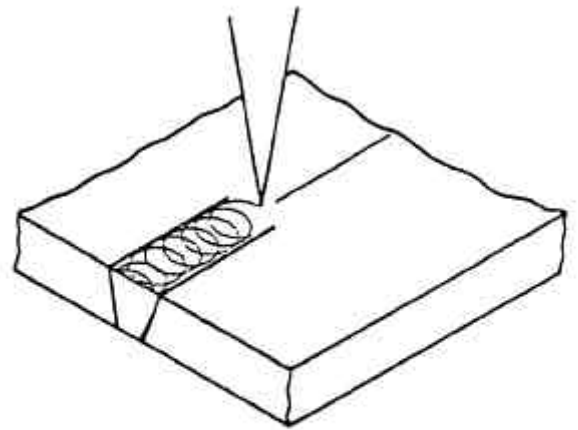
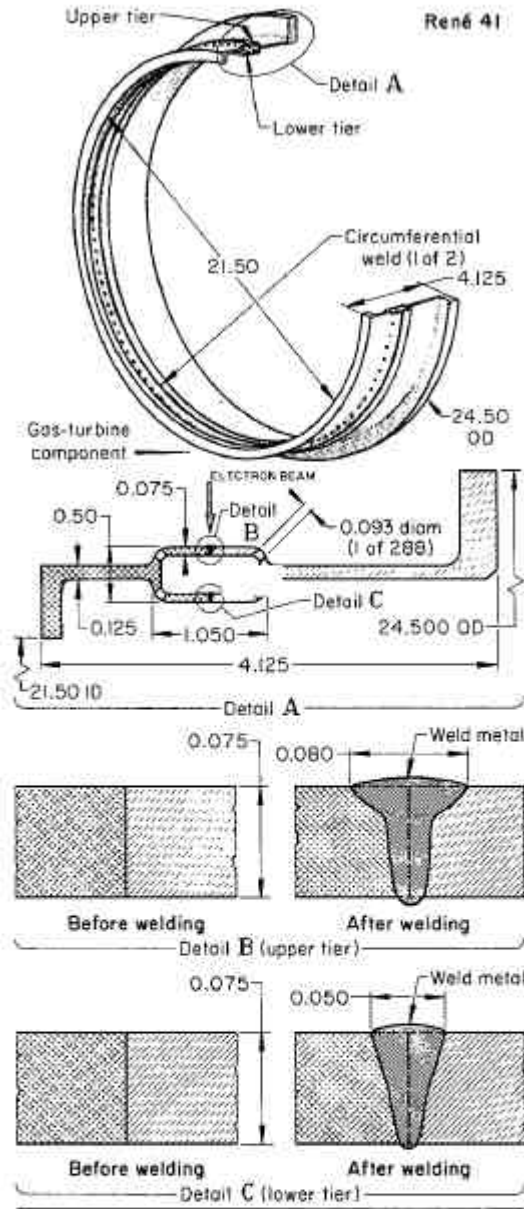


Fig. 24 - "Spinning" per saldatura laser e EB.

Fig. 23 - Componente di turbina sul quale sono state effettuate simultaneamente due saldature con Electron Beam.

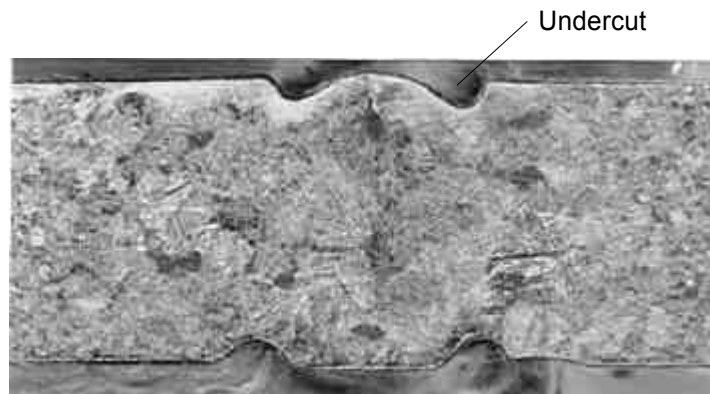
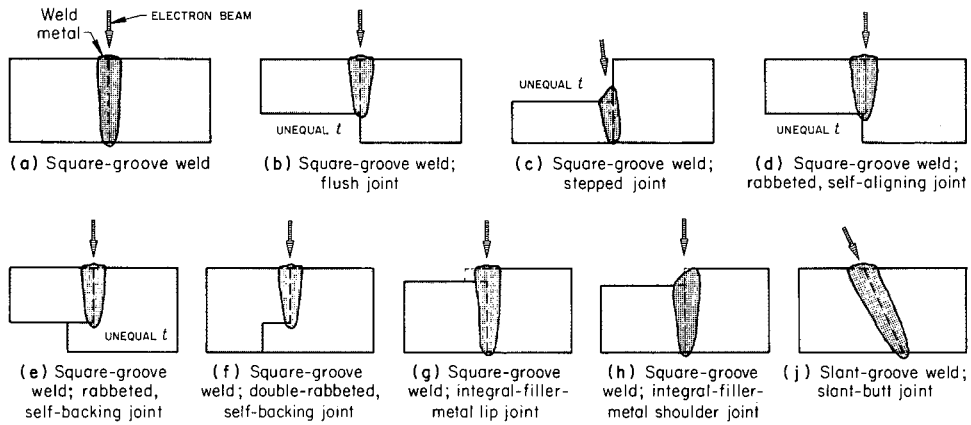
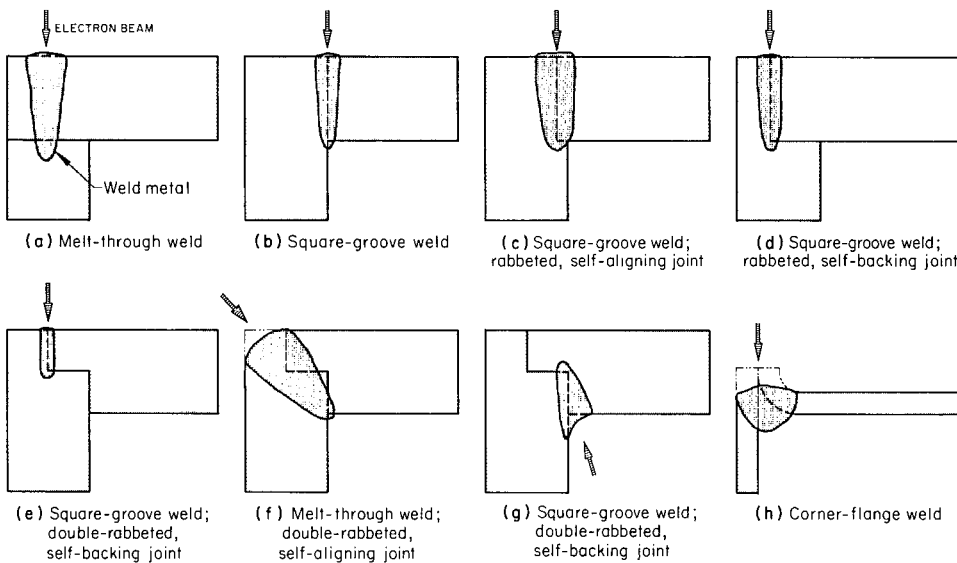


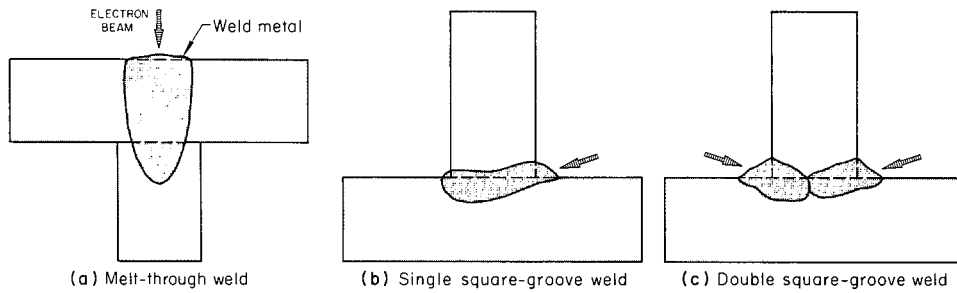
Fig. 25 - Undercut in un giunto electron beam. Materiale: Ti-6Al-4V, spessore 1 mm.



*Nine types of butt joints and welds used in electron beam welding*



*Eight types of corner joints and welds used in electron beam welding*



*Three types of electron beam welds in T-joints*

Fig. 26 - Giunzioni realizzabili con electron beam (e con laser).

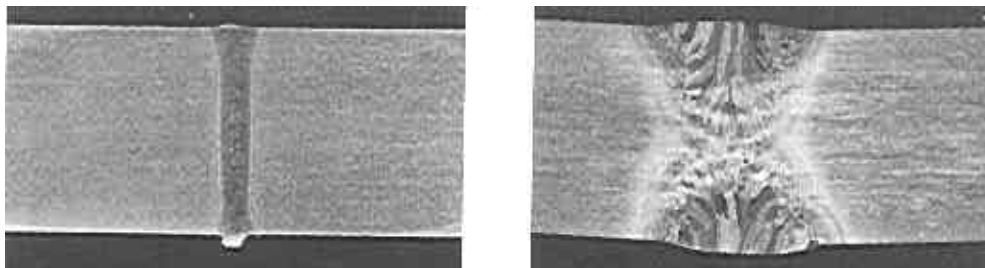


Fig. 27 - Cordone EB e plasma in una piastra avente spessore 1".



Fig. 28 - Laser welded T joint in 3.2 mm thick plate.

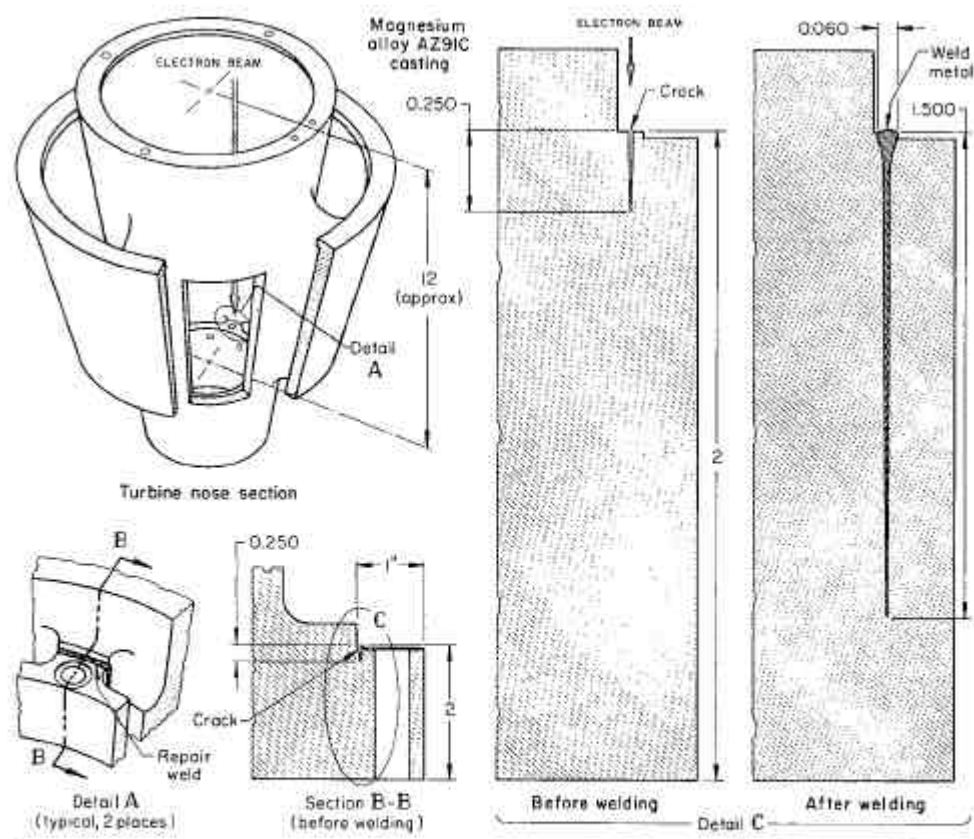


Fig. 29 - Riparazione con saldatura EB di due cricche di fatica nel cono di una turbina. Accesso limitato e possibilità di distorsione escludevano altre tecniche di saldatura.

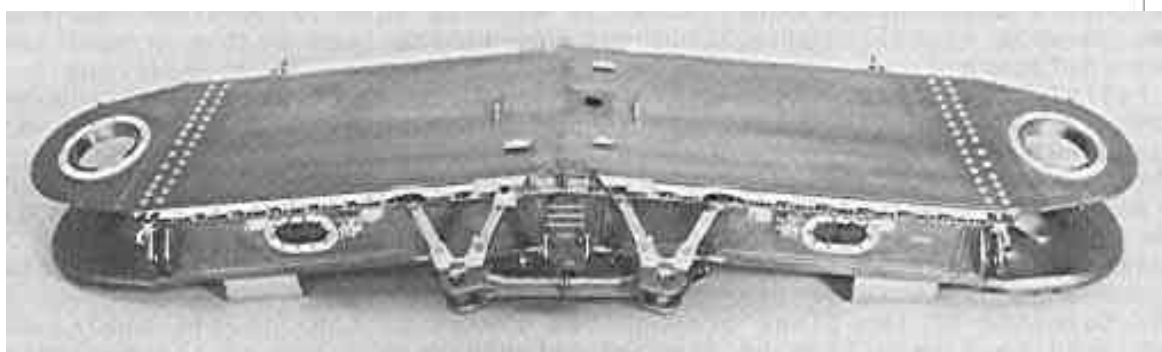


Fig. 30 - "Wing box" del Tornado.

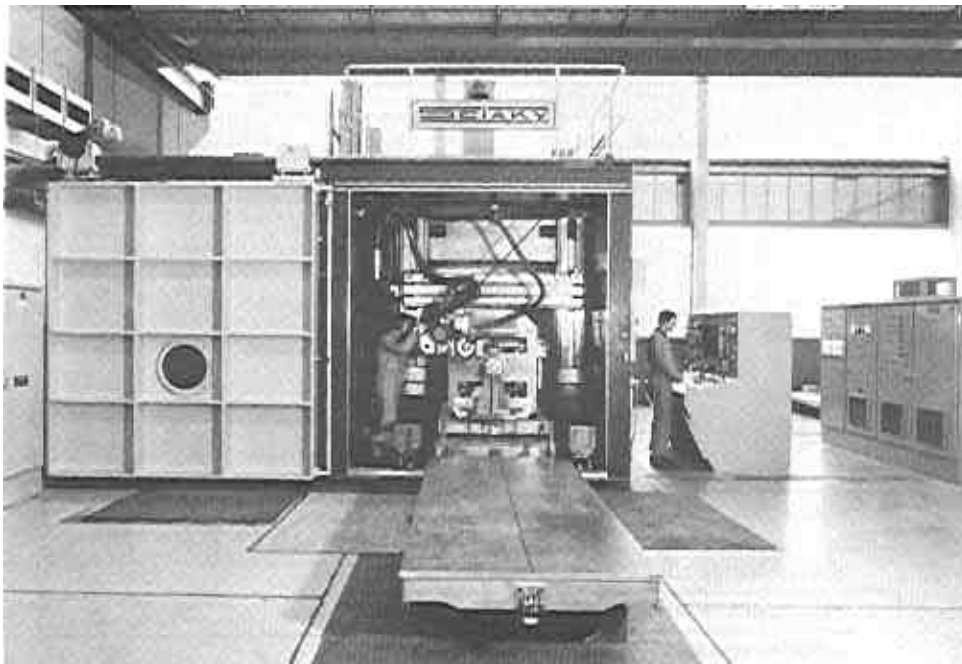
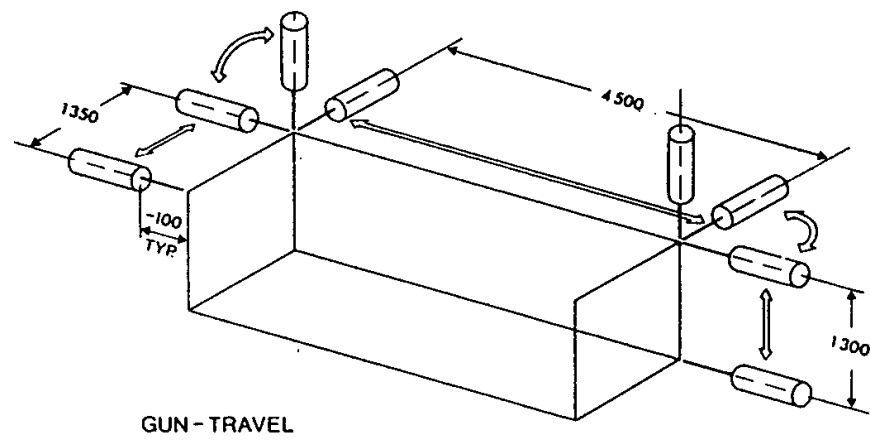


Fig. 31 - MBB; impianto per saldatura Electron Beam.

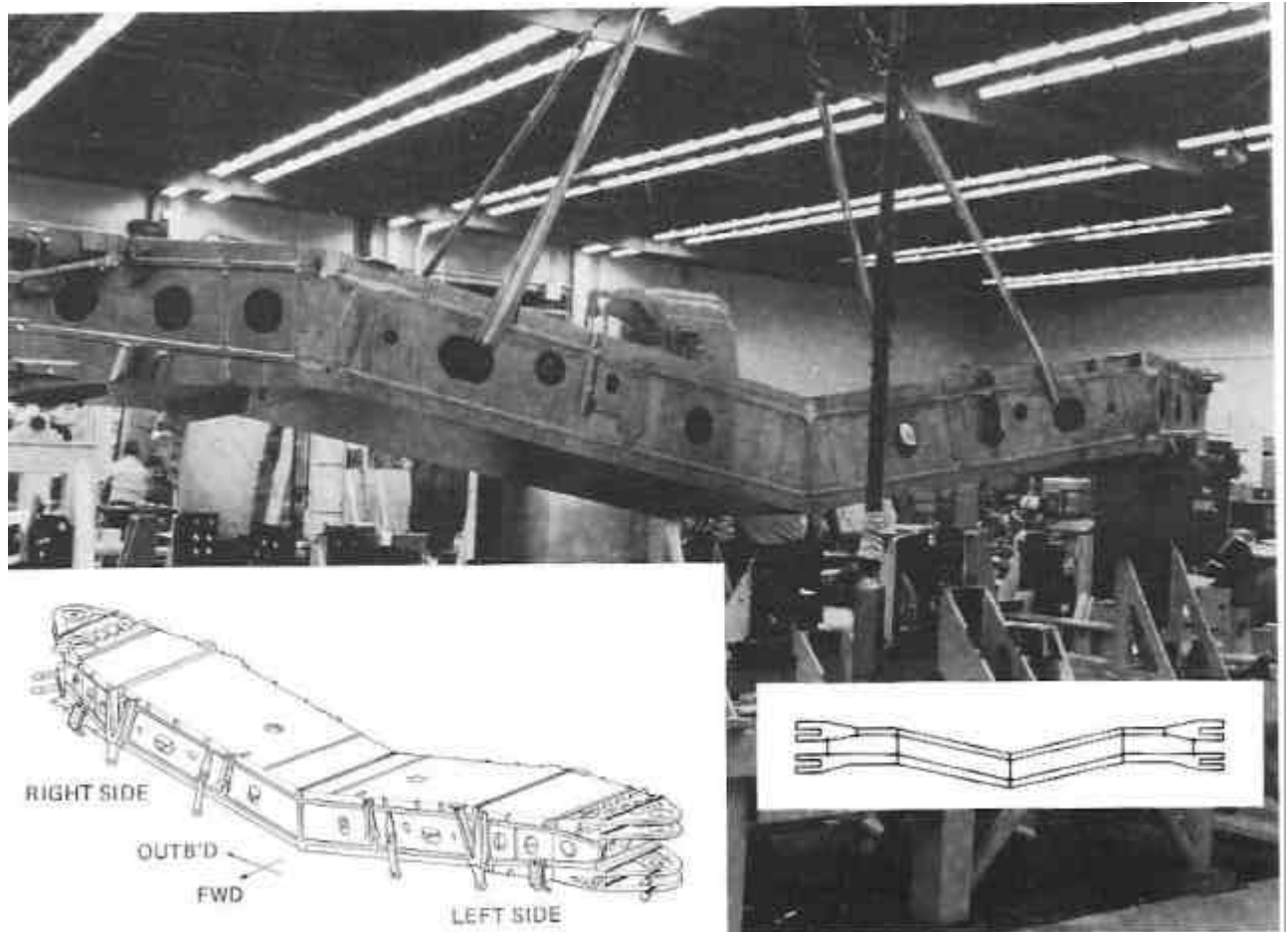


Fig. 32 - Pianetto centrale dell'ala dell'F-14.

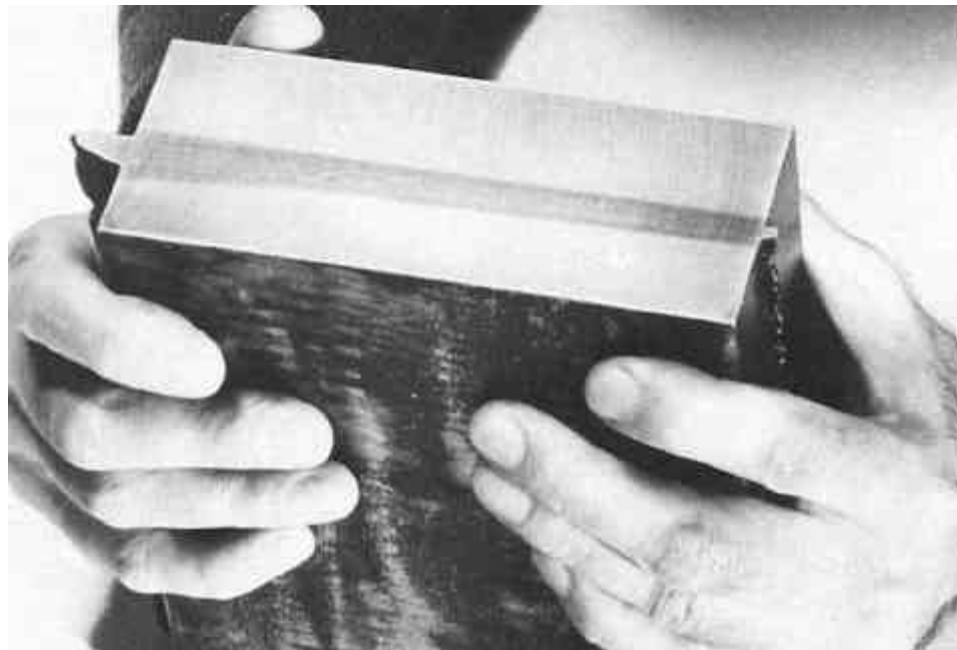


Fig. 33 - Saldatura Electron Beam di piastre in acciaio; spessore: 150 mm . Velocità di saldatura: 150 mm/1'.

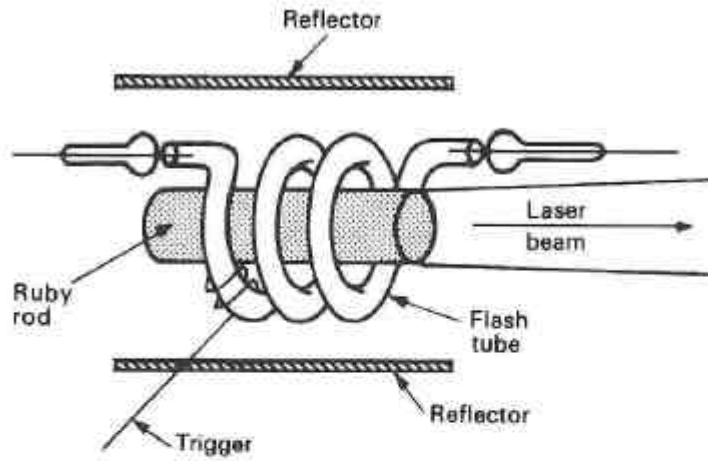


Fig. 34 - Mirrors at each end of the ruby crystal reflect light back and forth and the laser beam emerges through the semi-reflecting mirror on the right hand side.

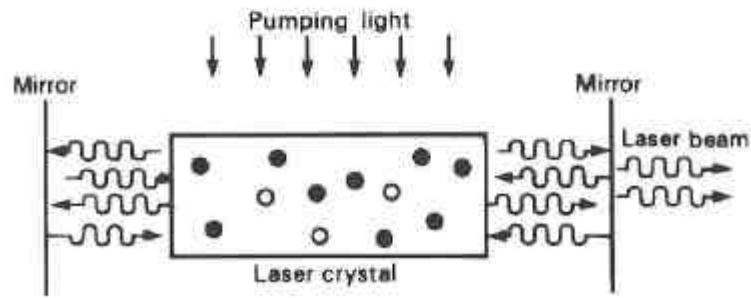


Fig. 35 - Laser system diagram.

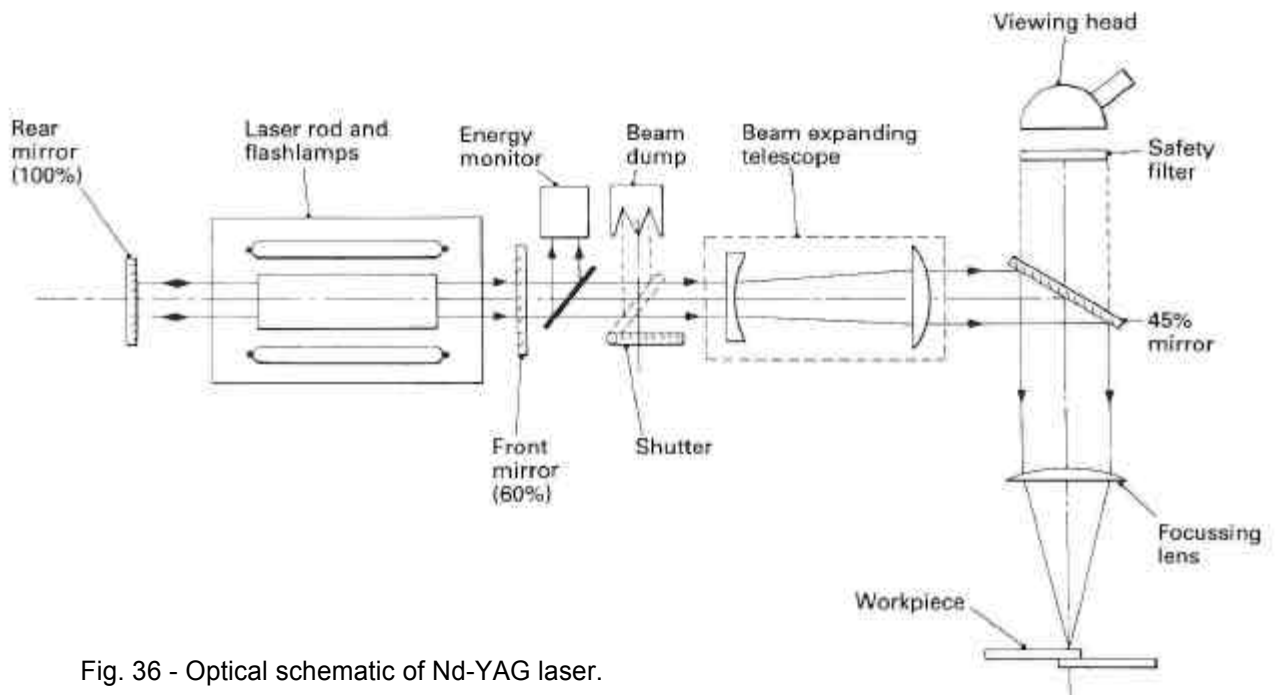


Fig. 36 - Optical schematic of Nd-YAG laser.



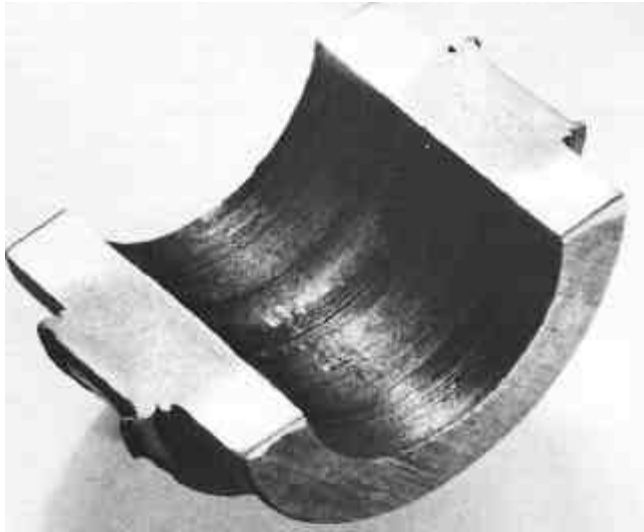


Fig. 37 - Elemento tubolare saldato per frizione.

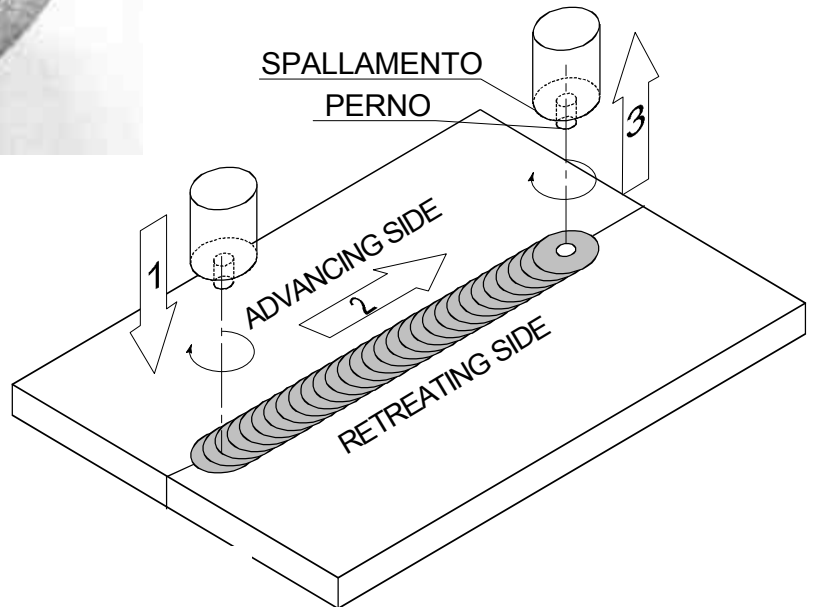


Fig. 37 - Friction Stir Welding.

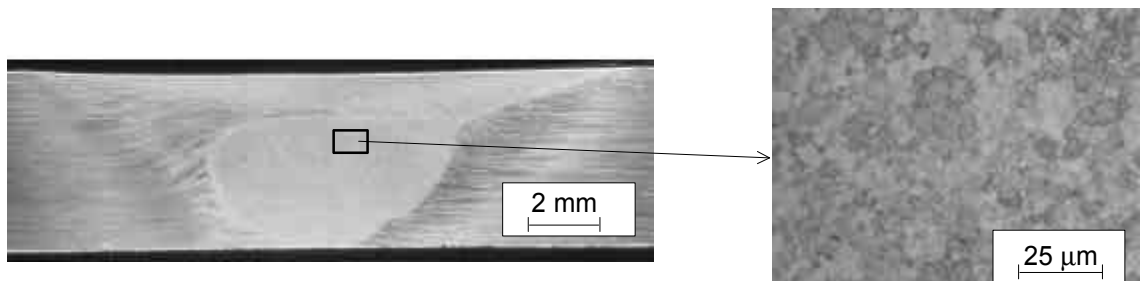


Fig. 38 - Macrografia di un cordone FSW nella lega 2195-T8.

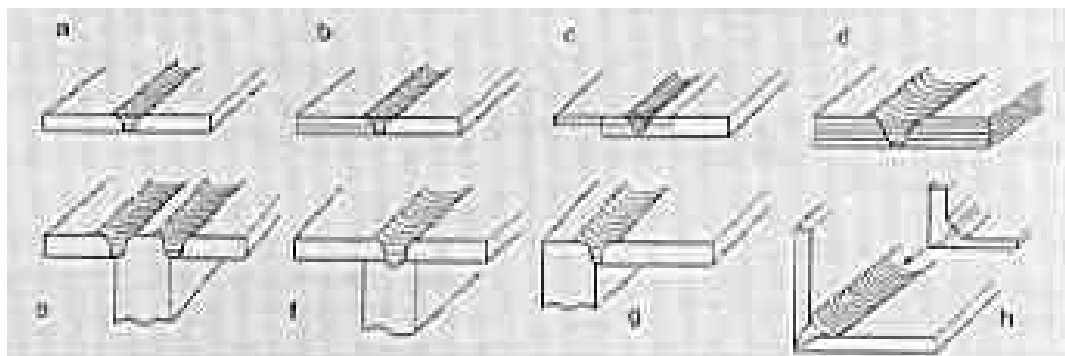


Fig. 39- Esempi di giunti FSW.



Fig. 40 - Dettaglio di un utensile FSW.

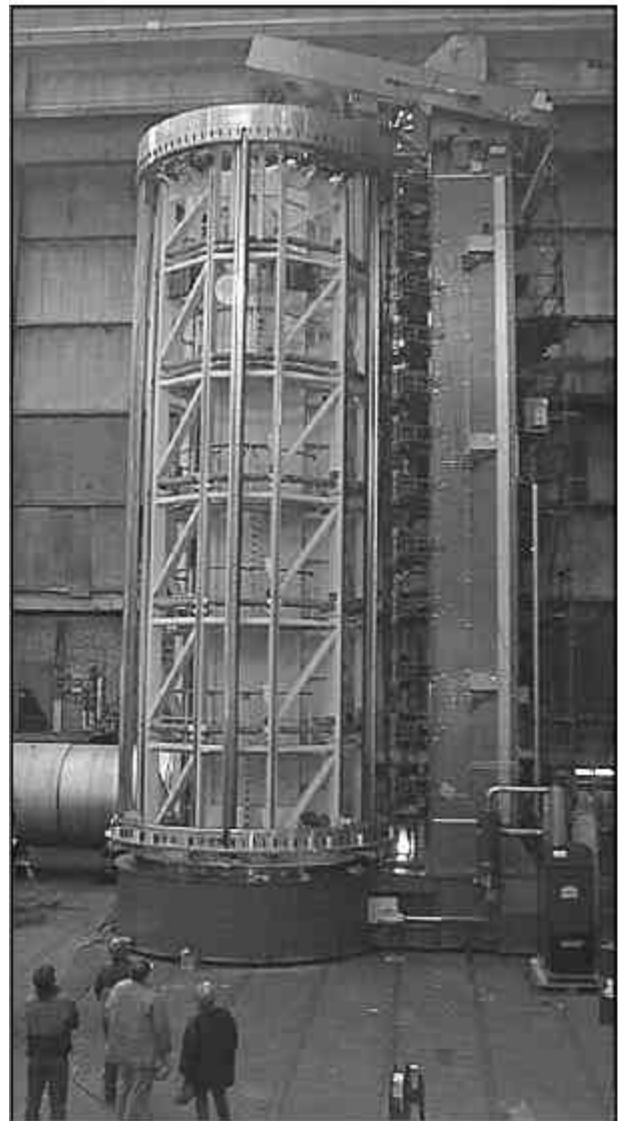
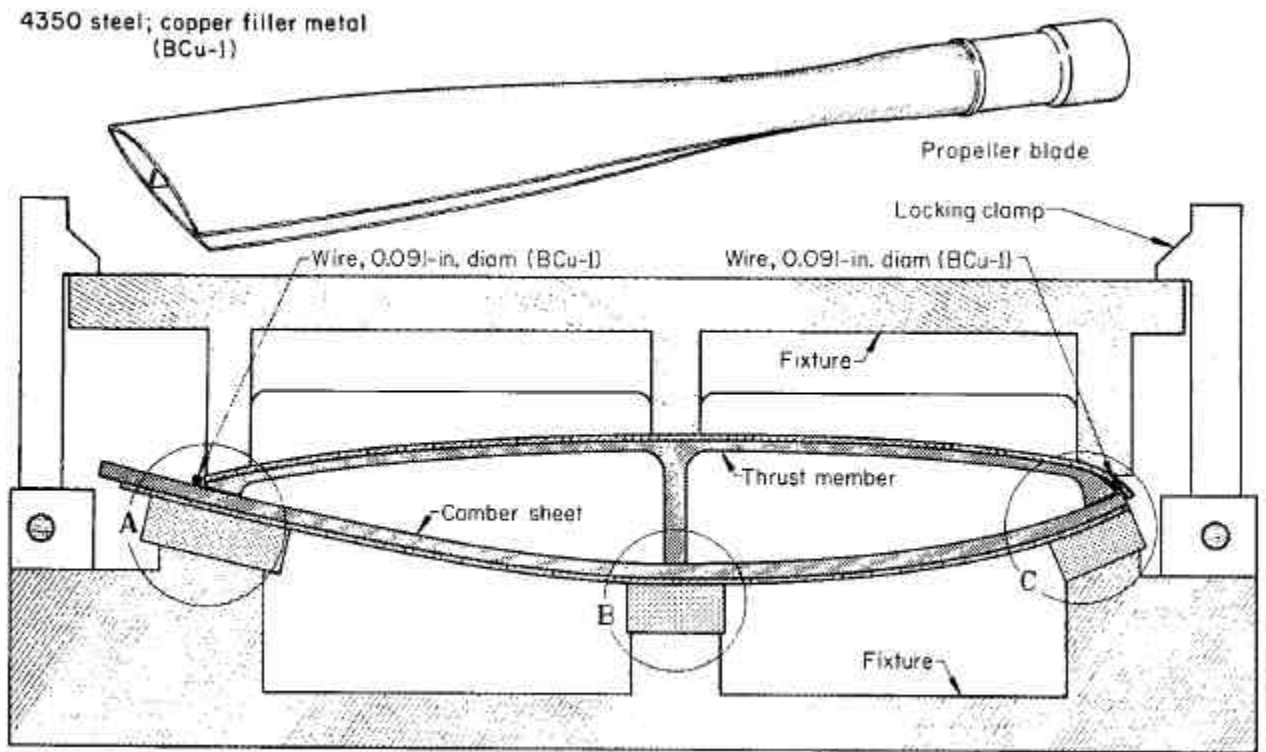


Fig. 41 - Macchina verticale per saldatura FSW.



Fig. 42 - Macchina orizzontale per saldatura FSW.



FOR A TYPICAL BLADE, MAXIMUM OVER-ALL WIDTH FROM LEADING EDGE TO TRAILING EDGE WAS 16.5 IN., AND TOTAL AREA OF BRAZED JOINTS WAS 106 SQ IN.

**Note A:** Sprayed with BCu-1 filler metal to a depth of 0.0015 to 0.002 in.

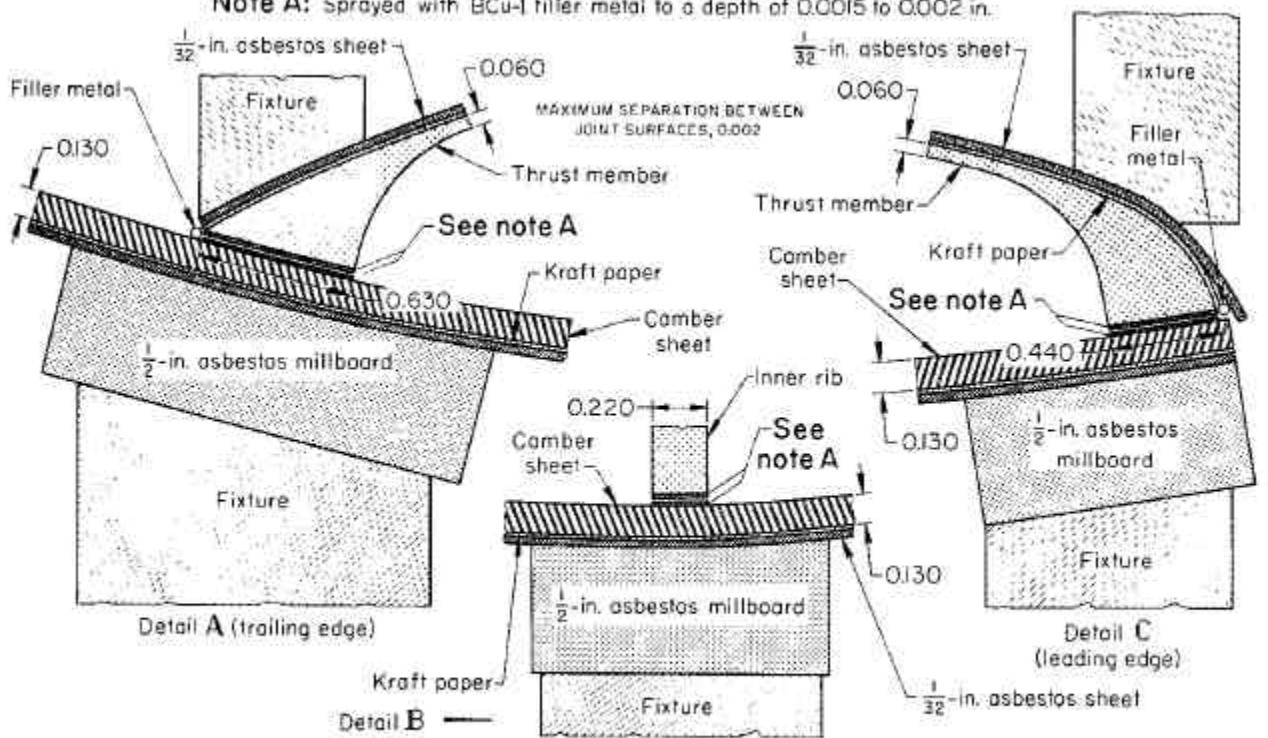
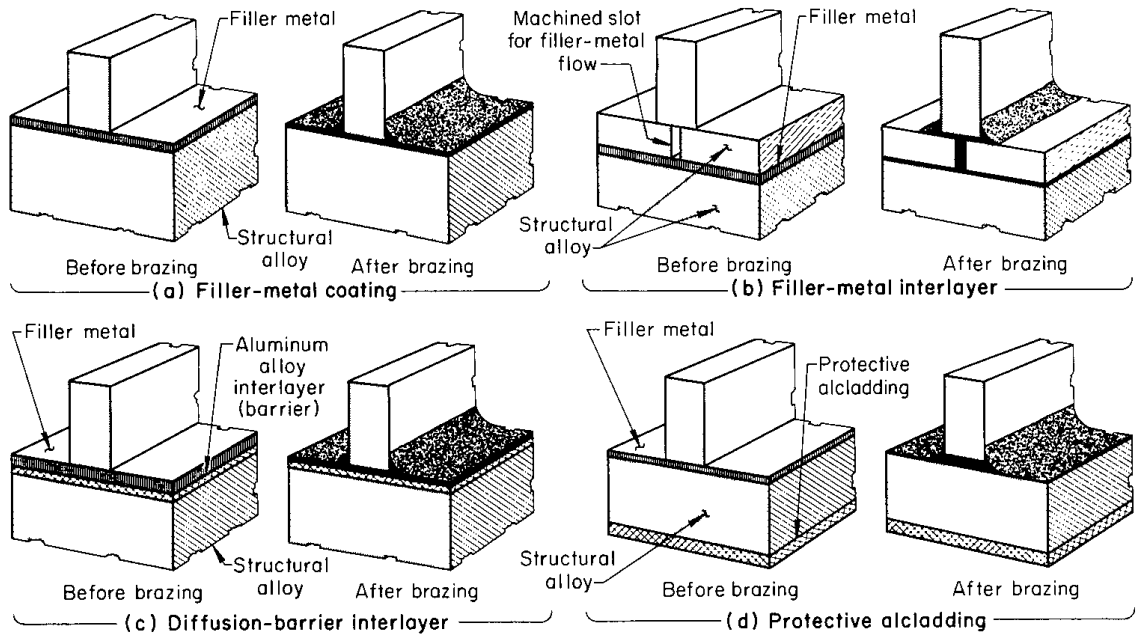


Fig. 43 - Attezzatura per la brasatura in forno di una pala per elica.



*Four types of aluminum brazing sheet, shown in joints with a vertical member*

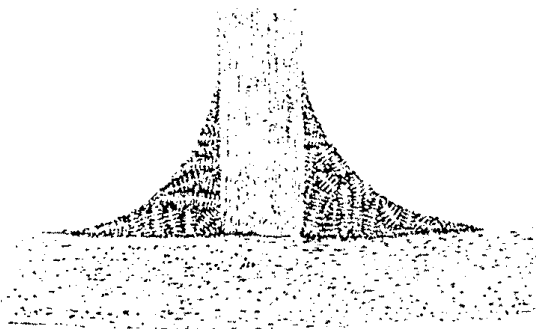


Fig. 44.

*Section showing fillets obtained with 0.040-in.-thick No. 22 brazing sheet as the vertical member in a T-joint with alloy 3003 as the horizontal member. Keller's etch. 15X.*