

# Studio della microstruttura di un giunto Al-Cu saldato mediante tecnica "Cut Welding"

M. Cabibbo, E. Quadrini

*Questo lavoro presenta uno studio microstrutturale di un sistema Al-Cu saldato a freddo sotto pressione per mezzo di un dispositivo progettato, realizzato e testato presso il nostro dipartimento [1].*

*Si tratta, finora, del primo esperimento riuscito di saldatura a freddo, sotto pressione mediante cut welding, realizzato in Italia. I provini, una volta saldati, sono stati studiati mediante tecniche EDAX (ovvero raggi X emessi dall'interazione tra fascio elettronico e campione) accoppiate ad osservazioni al SEM (per mezzo dei segnali SE e BSE). Si è, così, potuto stabilire che la zona di diffusione del rame nell'alluminio si estende fino a 6 µm all'interno della matrice di Al, mentre quella dell'alluminio si spinge fino a circa 1.5-2.0 µm all'interno della matrice di Cu. Questi dati indicano, in modo chiaro, la bontà della saldatura effettuata mediante la tecnica cut-welding. Inoltre, è stato fatto un trattamento termico di ricottura a 500°C/1h per una metà dei campioni saldati, per studiarne l'effetto nei confronti dei campioni che non hanno subito il post-trattamento. In questo secondo caso, i fenomeni interd diffusivi, favoriti dal trattamento termico, hanno migliorato l'efficienza del giunto saldato a freddo.*

## INTRODUZIONE

Le prime pubblicazioni di rilievo sulle tecniche di saldatura a freddo risalgono alla fine degli anni '60, da allora queste tecniche si sono sempre più diffuse nel campo delle saldature per metalli leggeri [2]. In particolare, la tecnica per cut welding è stata introdotta da De Chiffre il quale ha progettato e brevettato un dispositivo capace di risolvere, in modo veloce ed economico, il problema principale che coinvolge qualunque saldatura a freddo, ovvero, la preparazione superficiale dei materiali [3,4]. La necessità di introdurre queste nuove tecnologie per la saldatura di metalli è nata da rilevanti inconvenienti che si presentano durante l'operazione di saldatura in fase solida. Infatti, l'elevata conducibilità termica dei metalli esposti ad alte temperature facilita la formazione e crescita di seconde fasi fragili, in corrispondenza dell'interfaccia. Questo fenomeno genera giunti fragili che provocano la frattura, esattamente lungo i due lembi del materiale saldato termicamente [5,6]. La saldatura a freddo per cut-welding, proprio perché realizzata a temperatura ambiente o, comunque, per temperature mai superiori ai 200°C, non coinvolge alcuna formazione di seconde fasi in fase di saldatura. Inoltre, la struttura dei materiali così saldati è di tipo reticolare e non vi sono zone termicamente alterate o ossidate e le porosità sono del tutto assenti. Queste caratteristiche rendono la saldatura per cut-welding un sistema quasi indispensabile nei casi in cui si vogliono realizzare saldature atermiche, come nel caso di contenitori per cibi o nelle applicazioni aerospaziali [7,8].

## PROCEDURE SPERIMENTALI

### Parametri principali nel processo di saldatura a freddo

Ogni materiale, prima di poter essere saldato a temperatura ambiente, ovvero a freddo, ha bisogno di una preparazione

preliminare delle superfici. La preparazione consiste nel rimuovere i film di ossido che sono sempre presenti sulle superfici dei metalli a contatto con l'atmosfera<sup>(1)</sup>. Tale preparazione, in realtà, ha un duplice effetto: la rimozione degli ossidi e dei contaminanti, e la produzione di strati superficiali incruditi con tessitura rugosa in modo da consentire il contatto diretto metallo-metallo ed avere la massima esposizione della superficie del metallo. Una volta rimossi i film superficiali, la pressione esercitata durante la fase di saldatura deve essere tale da deformare le asperità superficiali tra i due materiali posti a contatto. Il livello di deformazione deve essere tale da aumentare il più possibile l'area effettiva di contatto tra le due superfici e diminuire di conseguenza la reciproca distanza fino al valore per il quale entrano in gioco le forze attrattive interatomiche.

Tra le varie strutture reticolari esistenti, quella cubica a facce centrate (CFC, come Al, Cu, Ni, Ag, Pb) risulta essere la struttura più facilmente deformabile [6]. In realtà, oltre ad una buona duttilità del materiale, per una buona saldatura a freddo, bisogna considerare anche il livello di "estrudibilità"; in quanto l'applicazione del carico esterno determina un accumulo di energia in corrispondenza delle zone di contatto sotto forma di alte densità di difetti reticolari (come vacanze ed atomi interstiziali) e di dislocazioni. Inoltre, un aumento dell'energia immagazzinata determina una loro migrazione per diffusione, in quanto, un aumento della temperatura, per effetto dell'attrito tra le superfici, favorisce la diffusione e la migrazione dei difetti. Questi meccanismi sono i principali responsabili della formazione dei nuovi legami metallici quando le superfici, pulite dagli ossidi, si trovano alla distanza cui agiscono le forze interatomiche. Dalle considerazioni fatte, è facile desumere come esista un valore di soglia di deformazione: per valori minori si ottengono piccolissime e sporadiche zone saldate con presenza di ampi microvuoti all'interfaccia, all'aumentare della deformazione le zone saldate aumentano in numero ed area efficace fino a quando, in corrispondenza del valore di soglia, l'interfaccia presenta una morfologia pressoché uniforme. La deformazione di soglia, pertanto, dipende dal materiale più malleabi-

M. Cabibbo, E. Quadrini,  
Dip. di Meccanica, Università di Ancona

Memoria pervenuta a gennaio 2000

<sup>(1)</sup> Fa eccezione l'oro che è l'unico metallo che non forma ossidi a contatto con l'atmosfera.

le e ciò comporta una limitazione nel processo di saldatura a freddo per pressione, in quanto è possibile saldare solo materiali con livelli di malleabilità diversi.

Sperimentalmente [7] si è visto che i metalli più facilmente saldabili a freddo sono quelli che hanno un più elevato rapporto tra la durezza dell'ossido superficiale e la durezza del metallo. In particolare, il metallo più duro, nella saldatura per cut-welding, è usato come elemento penetrante nell'altro più tenero. Si è inoltre osservato che i metalli più duri sono i più difficili da saldare a freddo. La ragione di tale difficoltà risiede nel fenomeno di ritorno elastico del materiale quando il carico non agisce più. Questo fenomeno genera un'apparente perdita di adesione tra i contatti formatisi per effetto del carico, durante la fase di saldatura. Infatti, il rilascio delle forze elastiche rompe i "ponti" saldati tra le asperità superficiali. Un trattamento di ricottura, in taluni casi, fornisce un sensibile incremento nella duttilità del materiale saldato garantendo un buon livello di resistenza del giunto [9].

**Realizzazione della saldatura a freddo tra Al e Cu per cut welding**

Un dispositivo per la saldatura a freddo, col metodo cut welding, è stato presentato e brevettato per la prima volta nel 1989 da De Chiffre [4]. Nel presente studio è stato utilizzato un dispositivo, progettato e realizzato presso il nostro Dipartimento [1].

In figura 1a è illustrato uno schema che mostra il funzionamento della tecnica di saldatura per cut-welding, mentre la figura 1b mostra i componenti principali del sistema utilizzato. Il sistema è configurato per la saldatura di un metallo di forma cilindrica più duro che funge da punzone per una lastra di metallo più tenero, che presenta un foro centrale e coassiale. Il materiale più duro (2a) viene spinto dal sistema meccanico (6) lungo le guide (5). Prima di entrare in contatto con il secondo materiale più duttile (1), subisce una "pelatura" per effetto dello zoccolo, o tagliente (4), che ha un gradino tale da asportare l'intero film di ossido presente sulla superficie del materiale. A questo punto, il materiale privo di ossidi superficiali è spinto all'interno del foro (3). Il foro prodotto sulla lamina (1) ha un diametro inferiore a quello del materiale più duro (2a), questo permettere una pelatura, questa volta, sul materiale più duttile (1). In questo modo, le superfici dei due materiali vengono a contatto, prive dei rispettivi film di ossido superficiale. Il foro presente sotto la lamina (3a) serve da camera di sfogo per il truciolo prodotto dalla pelatura del materiale più duttile (8). Nella posizione finale del processo (seconda figura), il foro sulla lastra si è allargato diametralmente per effetto degli sforzi radiali generati dal sistema meccanico di compressione che continua la sua azione. Questa seconda fase di compressione radiale consente la formazione dei legami interatomici, che, come visto nel paragrafo precedente, è condizione essenziale per una buona saldatura a freddo.

La velocità con la quale viene eseguita l'operazione di saldatura a freddo, in genere, non influisce sulla qualità del prodotto. Tuttavia, in questa particolare tecnica di cut-welding, maggiori velocità di taglio ed avanzamento producono giunti migliori e si è visto sperimentalmente che i migliori risultati si ottengono per velocità della pressa meccanica di circa 140mm/s (velocità di esercizio utilizzata per le prove). Sono stati realizzati 10 campioni di rame ed alluminio; i cilindretti in rame avevano un'altezza di 7.0mm ed un diametro di 8.2mm. Sono poi state realizzate cinque coppie di dischi in alluminio ognuna con una specifica tolleranza del foro interno, alloggiamento per il cilindretto di rame. In questo modo, il rame pelato dal tagliente, di apertura pari a 8.0mm, al momento del suo inserimento nel disco di alluminio si trova ad avere un diametro maggiore di quello del foro.

In tabella 1 sono riportati i valori delle tolleranze in gioco nei 10 differenti casi. Si è voluto variare i valori di tolleranza

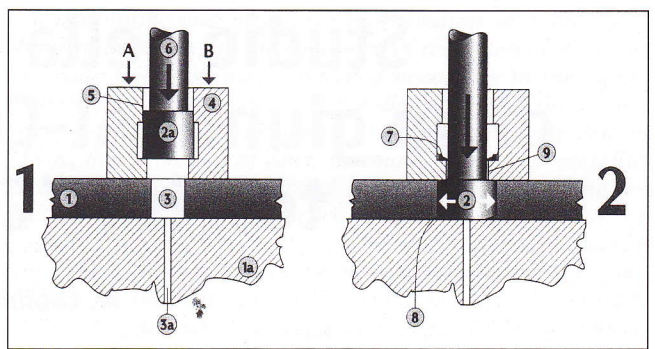


Fig. 1a: Schema di funzionamento del dispositivo per saldatura a freddo mediante tecnica cut welding utilizzato per lo studio qui presentato. 1): lastra in materiale più duttile (alluminio), 2,2a): cilindro di materiale più duro (rame), 3): foro coassiale, 4): tagliente, 5) guida, 6): sistema meccanico di compressione (punzone), 7): rame asportato, 8): alluminio pelato, 9): lama.

Fig. 1a: Working sketch of the device. 1): aluminium slab, 2, 2a): cylinder of copper, 3): co-axial hole, 4): cutting tool, 5) slot, 6): mechanical compression system (header), 7): copper removed, 8): aluminium peeled, 9): blade.

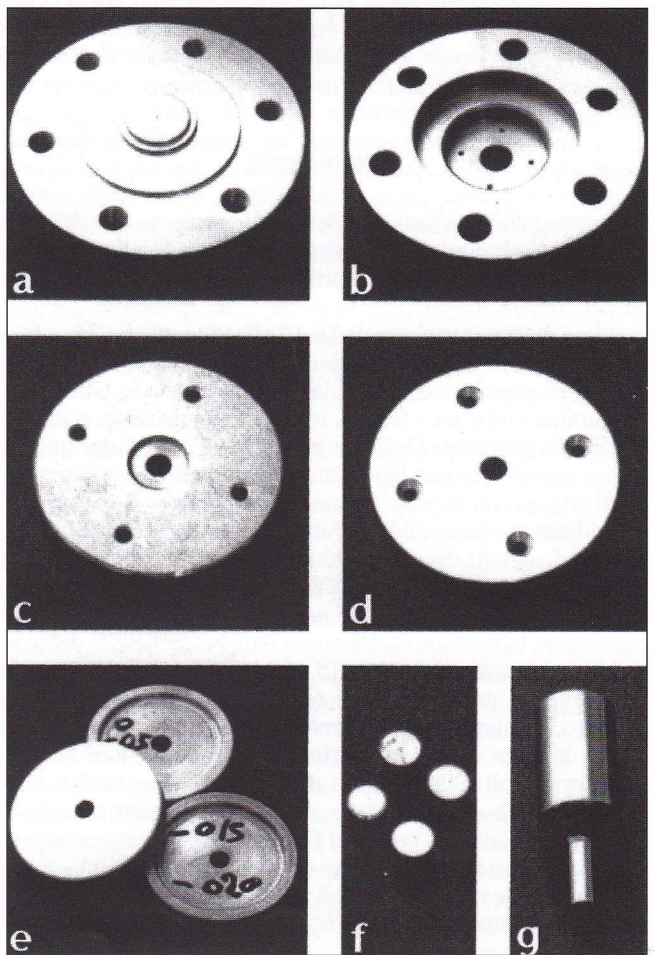


Fig. 1b: Componenti principali del sistema di saldatura a freddo per cut welding utilizzato per il presente studio. a) base del dispositivo con il sistema di fissaggio del campione di Al, b) parte superiore, c) adattatore con scanalature per alloggiare il rame asportato dal tagliente, d) tagliente, e) disco di alluminio, f) cilindretti di Cu, g) punzone.

Fig. 1b: Main cold cut welding components: a) base of device, b) upper part, c) adapter with slots to house the copper removed by the cutting tool, d) cutting tool, e) aluminium disc, f) cylinder of Cu, g) header.

$\phi A$	$\phi B$	$\phi 2$	$\phi 4$	$\phi 6$
+0.10	+0.00	-0.05	-0.10	-0.15
+0.00	-0.05	-0.10	-0.15	-0.20
Temperatura Ambiente				
$\phi A$	$\phi 1$	$\phi 3$	$\phi 5$	$\phi 7$
+0.10	+0.00	-0.05	-0.10	-0.15
+0.00	-0.05	-0.10	-0.15	-0.20
Post trattamento termico a 500°C				

Tab.1: Valori di interferenza tra rame ed alluminio. I campioni contrassegnati con le lettere A, B hanno valori di interferenza positivi e pertanto non coinvolgono la pelatura dell'alluminio da parte del cilindro di rame (sono, infatti, serviti per testare il dispositivo).

Tab. 1: Interferences between Cu and Al values. A, B specimens have positive values and then they do not involve the aluminium peeling from the copper cylinder (they were used as testing specimens).

per studiare la bontà del giunto saldato in funzione della quantità di spessore superficiale asportato. La metà dei campioni prodotti è stata sottoposta, dopo saldatura, a post-trattamento termico di ricottura a (500°C±0.5%) per 1h, in modo da promuovere sia i fenomeni diffusivi, sia il riassetto microstrutturale all'interfaccia dei due metalli; questi ultimi sono poi stati confrontati con i campioni che non hanno subito alcun post trattamento. La temperatura di 500°C è stata scelta in base al diagramma di fase binario Al-Cu nel quale il punto eutettico, critico per la saldatura a freddo<sup>(2)</sup>, è a 548.5°C.

Nelle diverse prove eseguite, i carichi applicati hanno registrato andamenti simili. In figura 2 è mostrato un tipico grafico in funzione della corsa del punzone, il quale può essere diviso in tre zone. Il picco iniziale descrive il momento in cui il campione di rame, attraversato il tagliente, entra in contatto con il foro della lamina di alluminio che ha un diametro inferiore. E' il momento in cui la pressione esercitata dal punzone è massima per effetto dell'azione tagliente del rame sull'alluminio. Il minimo valore del carico corrisponde alla configurazione del cilindro di Cu completamente penetrato all'interno del foro del disco di Al. Il carico cresce, nel terzo intervallo, per effetto della fase di ricalcatura del rame sull'alluminio, quando il punzone è ormai a fine corsa.

### RISULTATI E DISCUSSIONE

Tutti i campioni, corrispondenti alle condizioni di interferenza riportate in tabella 1, sono stati preparati per le osservazioni al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM). Per le osservazioni al SEM si è fatto uso del Segnale di Elettroni Retrodiffusi (BSE), in quanto sensibili al contrasto di numero atomico. E' stato così possibile identificare con esattezza il profilo della zona di saldatura tra rame ed alluminio e, soprattutto, le zone di diffusione di Cu nella matrice di Al ed Al nella matrice di Cu. Mediante analisi EDAX (ovvero analisi chimica ai raggi X) è stato possibile costruire, per interpolazione, le curve di interdizione per tutti i casi in esame. Il fascio elettronico, utilizzato per le misure ai raggi X, aveva un diametro pari a 3.0µm, sono state così scansate le sezioni trasversali dei giunti saldati. Le analisi ai raggi X

<sup>(2)</sup> E' bene tenersi al di sotto di tale valore per evitare la possibile formazione di seconde fasi fragili che, precipitando in seguito a raffreddamento dopo trattamento termico, danneggerebbero il giunto di saldatura.

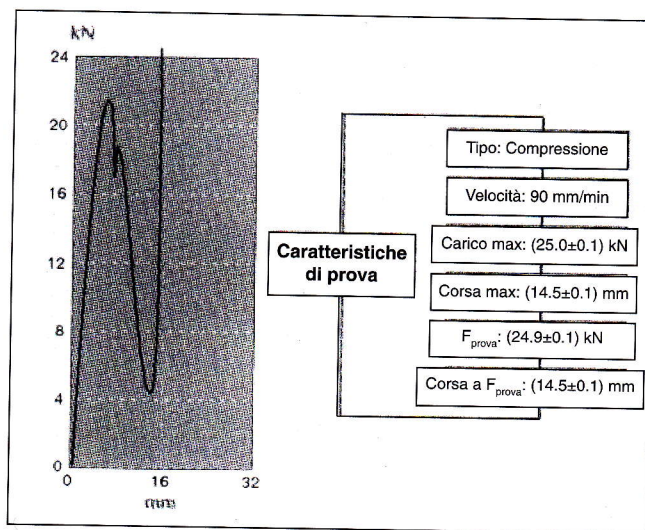


Fig.2: Andamento del carico applicato in funzione della corsa del punzone.

Fig. 2: Applied load vs. heading run.

(EDAX) sono state effettuate ad intervalli regolari di 3µm simmetricamente rispetto alla posizione del giunto e per una profondità di circa 15µm da ambo le parti. In questo modo, per ogni regione della superficie del campione investigata sono stati raccolti e misurati i picchi di risonanza a raggi X, dai quali e' stato possibile calcolare le percentuali medie degli elementi presenti nella zona di indagine espresse in peso atomico. Le figure 3a,b,c mostrano la morfologia dell'interfaccia, rispettivamente, per il campione con interferenza positiva (contrassegnato dalla lettera A), per uno con interferenza -0.10 (contrassegnato dal numero 4) per uno con lo stesso valore di interferenza ma dopo post trattamento termico (contrassegnato dal numero 5, vedi tabella 1). Nella fig.3a si può osservare una vistosa scollatura lungo il giunto saldato, si tratta del campione con interferenza positiva. In effetti, misure EDAX hanno evidenziato la presenza di frammenti di ossido Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lungo il bordo. In questo caso, le osservazioni SEM della microstruttura hanno evidenziato la non avvenuta saldatura tra i due metalli. La fig.3b mostra un bordo più uniforme, sintomo di una buona saldatura, la zona più scura ed irregolare è la matrice di Al, quella più chiara ed uniforme è la matrice di Cu. La morfologia irregolare della matrice di alluminio è dovuta alla sua maggiore malleabilità rispetto al rame. Indagini EDAX in corrispondenza del bordo di saldatura non hanno evidenziato alcuna presenza di ossidi, né di Al né di Cu. La fig.3c mostra in modo evidente il fenomeno di interdizione a seguito del trattamento termico eseguito dopo saldatura. Le regioni a differenti toni di grigio rappresentano zone a differente concentrazione percentuale di Cu ed Al. Ancora una volta, la zona più scura (in basso) è la matrice di Al, mentre quella più chiara (in alto) è quella di Cu. In questo caso, l'immagine registrata con i BSE presenta un contrasto di numero atomico tale da consentire, anche solo visivamente, una prima misura qualitativa dell'ampiezza della regione di interdizione. Nelle due pagine seguenti sono riportati i profili di interdizione, e sono anche indicate le ampiezze delle zone di diffusione (figura4). Per i campioni che non hanno subito alcun post trattamento la regione interessata dalla diffusione è pari a circa 8µm, di cui 6µm sono relativi alla diffusione del rame all'interno della matrice di alluminio, mentre l'alluminio diffonde all'interno del rame per soli circa 2µm. Pertanto, è il rame che funge, per così dire, da collante tra i due materiali garantendo la saldatura del giunto. Questi risultati sono in pieno accordo con il valore del coefficiente di diffusione del rame nell'alluminio, che è superiore a quello di diffusione

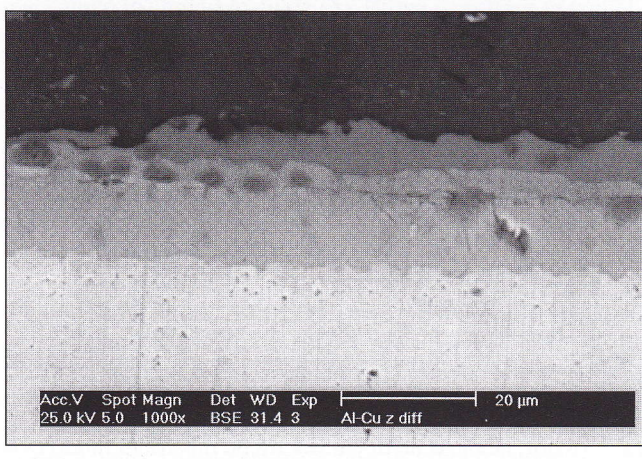
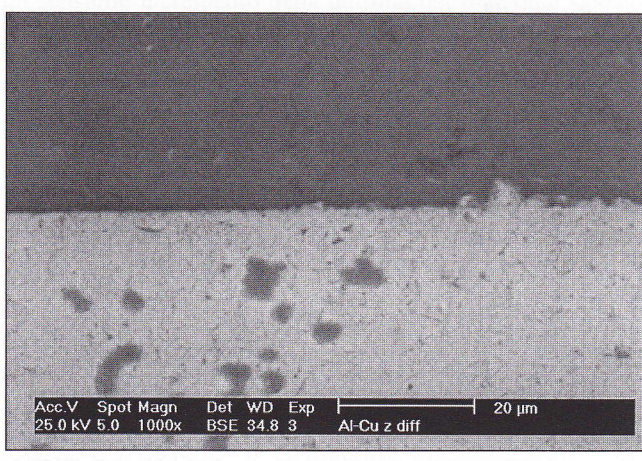
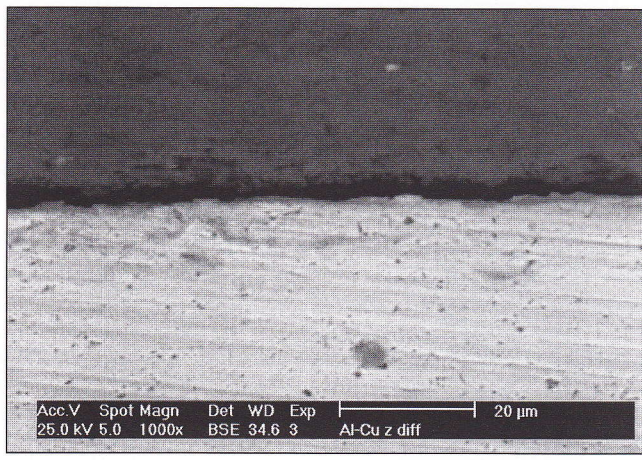


Fig.3a,b,c: Immagini SEM dell'interfaccia Al-Cu nei casi di: a) interferenza positiva (A) (500x), b) interferenza: -0.10 (4) (500x), c) interferenza: -0.10 e post trattamento termico a 500°C/1h (5) (1000x). Le immagini sono state raccolte mediante BSE.

Fig.3a, b, c: SEM images of the Al-Cu joint interface for the following cases: a) positive interference (A) (500x), b) interface: -0.10 (4) (500x), c) interference: -0.10 and post annealing @500°C/1h (5) (1000x). The images were recorded by means of the BSE signal.

dell'alluminio nel rame. Discorso diverso va fatto nel caso dei campioni che hanno subito, dopo saldatura, il trattamento termico a 500°C/1h. In questo caso, la regione di interdizione si spinge in entrambe le direzioni simmetricamente rispetto all'interfaccia, fino a 9μm e più. Tuttavia, il fenomeno più rilevante ed importante è la presenza di zone discrete a concentrazione percentuale variabile di Cu ed Al da ambo i lati dell'interfaccia. Questo fenomeno garantisce un elevato grado di uniformità microstrutturale lungo l'interfaccia alluminio-rame.

Le misure di diffusione sono state eseguite lungo tutto il perimetro dell'interfaccia e per tutti i campioni e si è visto che non presentano disuniformità tra zone vicino ai bordi e zone centrali (ovvero, lontane dai bordi).

Le curve di diffusione sono state realizzate per interpolazione sui dati sperimentali, indicati con i punti pieni nelle figg.4. Ogni dato sperimentale è il risultato di una media statistica su 5 misure diverse, eseguite su ogni punto.

**CONCLUSIONI**

Le indagini microscopiche effettuate lungo le zone di saldatura del sistema binario Al-Cu, prodotto mediante saldatura a freddo per cut welding, hanno dimostrato la possibilità di ottenere pezzi Al-Cu saldati a freddo. Inoltre, il buon esito delle indagini ha contribuito a dimostrare la bontà del dispositivo utilizzato per saldature a freddo, dispositivo che è stato progettato e realizzato presso il nostro Dipartimento. I risultati ottenuti possono essere così riassunti:

1. **Campioni non trattati termicamente**
  - a) La diffusione del rame all'interno della matrice di alluminio si spinge fino ad una profondità media di 6mm, mentre la profondità di penetrazione dell'alluminio all'interno della matrice di rame è di circa 2μm. Questo diverso comportamento si spiega con le diverse dimensioni medie dei due tipi di atomo. Gli atomi di Al hanno dimensioni maggiori di quelle di Cu e pertanto diffondono con minor facilità e questo vale tanto più, quanto più bassa è la temperatura di diffusione. Pertanto, per la configurazione Al-Cu, il rame funge da "collante" nel processo di saldatura a freddo.
  - b) L'adesione tra i due materiali presenta caratteristiche uniformi lungo l'intero perimetro dell'interfaccia.
  - c) Analisi EDAX lungo l'interfaccia non hanno indicato presenza alcuna di seconde fasi.

2. **Campioni che hanno subito il post trattamento termico a 500°C/1h**
  - a) L'indagine, effettuata mediante il segnale da elettroni retrodiffusi (BSE), ha evidenziato zone a diverso contrasto di numero atomico. Ogni zona corrisponde ad una diversa concentrazione media degli atomi di Al e Cu presenti; queste zone indicano un fenomeno interdifferenziale più esteso e complesso del caso precedente.
  - b) La regione media di diffusione si estende in modo simmetrico, all'interno delle due matrici, fino a profondità di circa 12μm.
  - c) Anche in questo caso non è stata rilevata alcuna presenza di seconde fasi.

Si può, quindi, concludere che il post trattamento termico ha favorito in modo efficace i fenomeni diffusivi, migliorando la qualità della saldatura tra i due metalli ed omogeneizzando l'interdiffusione di Al e Cu in entrambi gli intorni dell'interfaccia.

Inoltre, il fenomeno diffusivo non sembra dipendere dalla quantità di alluminio asportato durante il processo cut welding e questo vale, sia per i campioni che non hanno subito il post trattamento, che per gli altri. Pertanto, l'asportazione di 0.05mm (ovvero 50mm) di alluminio è sufficiente ad attivare i fenomeni di adesione e diffusione tra i due metalli.

**RINGRAZIAMENTI**

Gli autori desiderano ringraziare la Meccano S.p.A. di Fabriano, per il prezioso aiuto fornito in fase di realizzazione del progetto e per la cortese collaborazione durante le prove sperimentali.

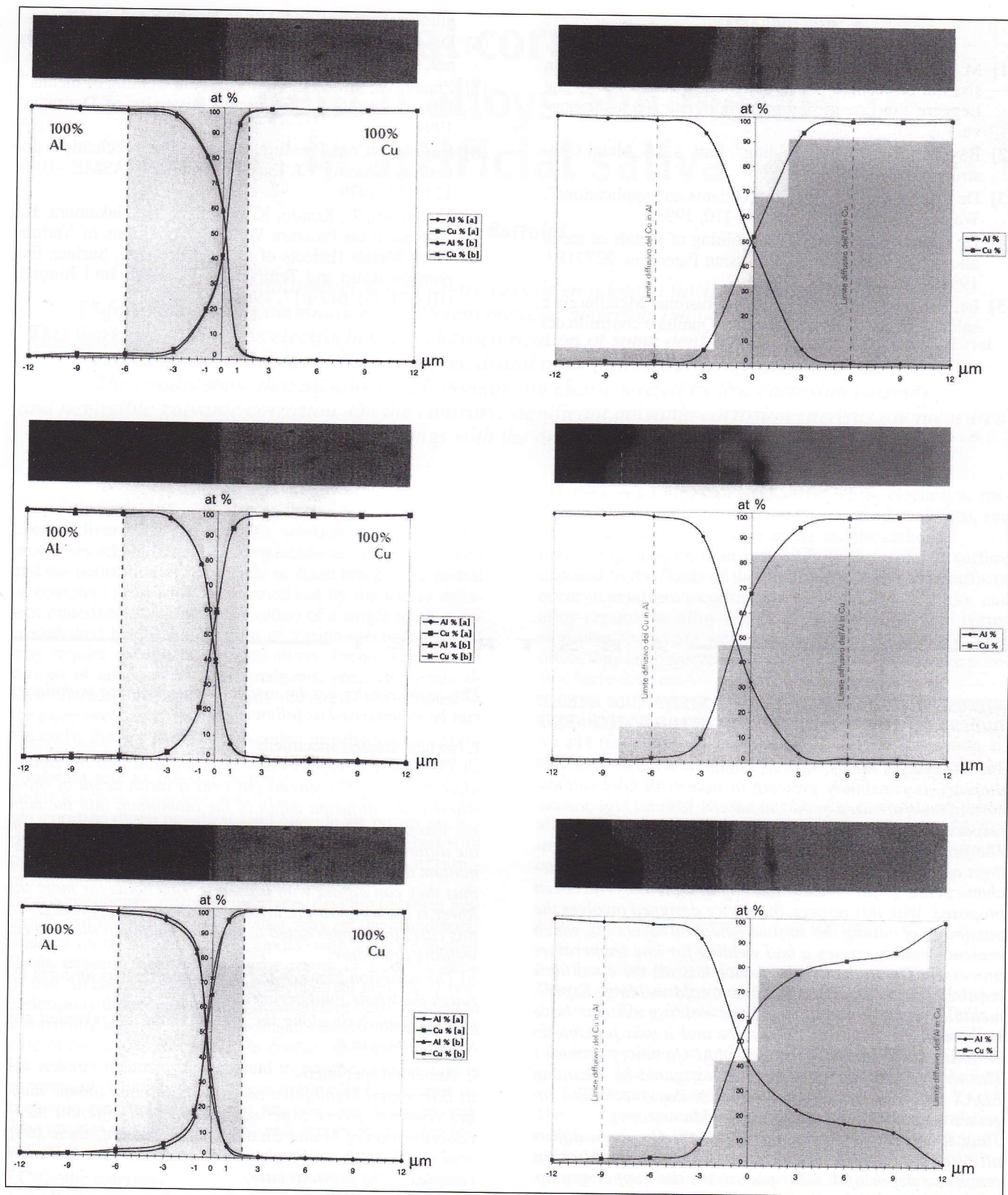


Fig.4: Zone di interdifferenza di Cu ed Al e relative curve; per ogni grafico è mostrata la relativa micrografia SEM dell'interfaccia. Le curve di diffusione sono state realizzate per interpolazione dei dati sperimentali raccolti mediante analisi EDAX nei vari punti d'indagine. I campioni, contrassegnati dai numeri dispari, sono quelli che hanno subito il post trattamento termico a 500°C/1h. La dimensione dello spot elettronico, per tutti i casi riportati, è di 3.0mm e la tensione di accelerazione di lavoro è pari a 25.0kV. I dati riportati sono espressi in % atomica.

Fig. 4: Interdiffusion zones of Cu and Al with related curves, for every graphic the SEM interface micrograph is shown. The diffusion curves have been drawn by interpolating the experimental EDAX data. The specimens, marked with odd numbers, are the ones subjected to the annealing treatment at 500°C/1h. The spot size is 3.0mm and the acceleration voltage is 25.0kV. The data are expressed in %at.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Cabibbo, E. Quadrini, "Studio e Realizzazione di un sistema meccanico per la Saldatura a Freddo di Leghe Leggere", in fase di stampa sulla rivista: Tecniche nuove.
- [2] Bay, N., et al., "Cold Welding", Part. 1,2,3, Metal Construction, (18), 1986.
- [3] De Chiffre, L., "Cut welding variants and applications", Welding Review Int'l, (8), 100-110, 1993.
- [4] De Chiffre, L., "Methods for joining of metals or metal alloys by cold welding", European Patent no. 0277183, 1991.
- [5] Ist. Ital. Saldatura, "Saldatura per fusione: Metallurgia e saldabilità dei materiali metallici-Qualità e controllo dei giunti saldati, (2)", ed. Ulrico Hoepli S.p.A., 1996.
- [6] Del Giudice, E. ed I. "Saldatura in fase solida", Lamiera n.9, 98-113, 1996.
- [7] Zhang, W., "Bond formation in cold welding of metals", PhD dissertation, Technical University of Denmark, 1994.
- [8] Bay, N., "Cold Pressure Welding-The Mechanism governing bonding", J. Eng. For Industry, (ASME -101), 121-127, 1979.
- [9] Nakamura, T., Kondo, K., Sasahara, H., Nakamura, K., "Research on Pressure Welding Conditions of Various Work Metals (Effects of Contact Pressure, Surface Expansion Ratio and Temperature)", JSME Int'l Journal, (III), 31, (3), 612-617, 1988.

A B S T R A C T

**MICROSTRUCTURE STUDY OF AN AL-CU SYSTEM COLD WELDED UNDER PRESSURE BY MEANS OF "CUT-WELDING" TECHNIQUE**

The use of light alloys, such as aluminium, magnesium and titanium, is constantly growing in industrial applications, most of them are used in the automotive (Al and Mg) and aerospace industry (Al and Ti).

The present study is focused on the metallurgical applications of the welding process of light alloys. Moreover, a mechanical design for cold cut welding of light alloys has been proposed. With this respect, the device designed involves the possibility of cutting the surface oxidation layers off, which presence mainly causes a bad welding for low temperature processes. Theoretically, the device has all the conditions required for a correct and efficient cold welding. Experimentally, some aluminium-copper welding systems have been made by means of this device and it was possible to establish the goodness of the welded Al-Cu binary system.

The welded samples have been investigated by means of EDAX (electron Device Analyser by X-Rays) technique together with SEM (Scanning Electron Microscope).

Thus, it was possible to establish that the Cu atoms diffuse till 6 µm into the aluminium region, whereas the Al atoms reach the depth of 1.5-2.0 µm within the copper region. These results clearly show the possibility of obtaining welded samples by means of the designed cut welding device.

A heat treatment at 500°C/1h for half of the welded samples has been performed. Then the two conditions have been compared. The post-welding heat treatment promoted interdiffusion phenomena, improving the efficiency of the cold welded joints.

The microscopic investigations performed along the cold cut welded joints of the binary system Al-Cu showed the possibility to get welded Al-Cu specimens by means of the cold cut welding technique. Moreover, the successful welding of the Al-Cu binary system showed the goodness of the designed device.

The main results got by means of this welding techniques can be summarised as follow:

I. No heat-treated specimens

a) The atoms of copper have been diffused into the aluminium matrix and it spread out over a mean depth of 6µm; whereas the diffusion depth of the aluminium into the copper was only of 2µm. This different behaviour depends upon the different atomic dimensions of the two elements; the aluminium atoms have a higher diameter than the copper ones, thus they can diffuse with less ease. This holds the more the lower is the temperature involved in the welding process. In this case, the copper acted as atomic binding in the cold cut welding procedure.

b) The adhesion between the two materials was uniform through the whole joint perimeter.

c) EDAX analysis along the interface did not revealed any second phase in it.

2. Annealed specimens

a) BSE signal highlighted zones with different atomic number contrast. Every zone was related to a different mean concentration of Al and Cu atoms there present; these steep zones indicate interdiffusional phenomena wider and more complex to the previous case.

b) The mean diffusion region spread symmetrically out, within the two materials, over a depth of 12µm.

c) Yet, in this case no trace of second phase along the interface was revealed.

Thus, the results can be summarised as follow:

The post annealing treatment strongly induced diffusion phenomena, yielding better results. Moreover, the diffusion does not seem to be affected by the amount of aluminium surface layers peeled out and this holds for the heat treated and for the other ones. Thus, the lower tolerance of 0.05 mm (i.e. 50µm) was enough to set going the adhesion and diffusion phenomena between the two materials.