

ASTE DI PERFORAZIONE FRIZIONATE

Caratteristiche meccaniche e geometriche delle giunzioni realizzate con tecnica di saldatura ad attrito

Dr. Ing. Renzo Chirulli (*)

Dr. Ing. Michele Dassisti (**)

Prof. Ing. Luigi Galantucci (**)

Sommario

L'asta di perforazione è un prodotto relativamente semplice sia sotto l'aspetto progettuale che produttivo. Essa essenzialmente si può pensare costituita di tre elementi critici (fig. 1) rispetto alla rispondenza del prodotto alle sollecitazioni di esercizio:

- 1) il tubo;
- 2) la giunzione con il manicotto;
- 3) il manicotto o tool joint.

Sebbene questo prodotto sia ormai ben consolidato sotto l'aspetto progettuale (norme API) l'adozione di nuove tecnologie d'assemblaggio può portare a significativi miglioramenti delle caratteristiche meccaniche e fisiche del prodotto stesso.

È questo il caso della adozione della saldatura ad attrito, sempre più frequentemente impiegata per la fabbricazione delle aste di perforazione destinate ad applicazioni nelle opere di Ingegneria Civile. Le aste realizzate con questa tecnica, commercialmente chiamate "aste di perforazione frizionate", posseggono, se correttamente esegui-



Figura 1

te, caratteristiche di resistenza meccanica nettamente superiori rispetto a quelle prodotte con tecniche di saldatura con apporto di materiale (es. saldatura a filo continuo).

Nel presente lavoro vengono esaminate le giunzioni realizzate con tecnica di saldatura ad attrito sotto il profilo delle caratteristiche meccaniche ottenibili, analizzando corrispondentemente quale configurazione geometrica raggiunge il giunto nelle condizioni di processo che forniscono i migliori risultati sotto l'aspetto meccanico e metallografico. L'esame qualitativo della variabilità della configurazione geometrica in funzione dei parametri di processo, correlata alle variazioni che possono intervenire sotto l'aspetto meccanico e metallografico, completa il presente lavoro, fornendo una metodologia di analisi qualitativa della giunzione, nonché il quadro delle grandezze geometriche, meccaniche e metallurgiche che è necessario analizzare per accertare la bontà della giunzione stessa e quindi del prodotto.

Il processo di saldatura ad attrito a potenza continua

Il processo di saldatura ad attrito a potenza continua prevede tre stadi fondamentali [4], che qui esaminiamo in relazione al fenomeno della formazione del flash:

1° livello di attrito - durante questa fase, della durata di pochi secondi, i componenti in saldatura sono posti a contatto ed in moto relativo l'uno rispetto all'altro. Per effetto dell'attrito tra le superfici a contatto ha luogo la pulitura e conseguentemente la preparazione delle superfici senza che si verifichi un'apprezzabile espulsione di materiale.

2° livello di attrito - I componenti in saldatura sono ancora a contatto ed in moto relativo l'uno rispetto all'altro, però con pressioni più elevate. È questa la fase in cui viene prodotto, grazie appunto all'attrito, il calore necessario al processo. Il materiale raggiungendo una temperatura di poco inferiore a quella di fusione (ca. 1350 °C), si porta in uno stato altamente plastico. A causa dell'espulsione radiale di materiale allo stato plastico, i componenti in saldatura subiscono un accorciamento assiale (*burn off*). In questa fase il materiale allo stato pastoso espulso in senso radiale viene a formare il flash sia verso l'esterno che verso l'interno.

fase di forgiatura - Interrotto il moto relativo, si applica una istantanea ed intensa spinta assiale (pressione di forgiatura) che porta ad un brusco aumento delle pressioni di contatto tra i componenti. Molta dell'energia impiegata si ritrova sotto forma di lavoro di

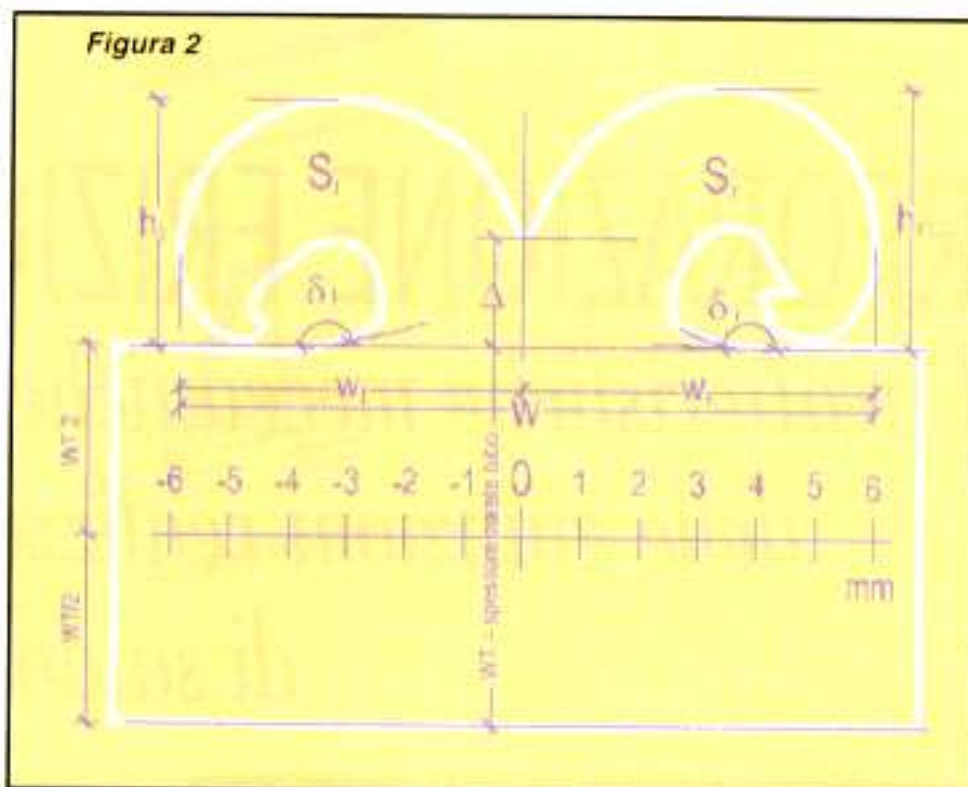
(*) Ingegnere libero professionista consulente per l'area produzione della Colli Drills S.r.l.

(**) Dipartimento di Progettazione e Produzione industriale del Politecnico di Bari.

deformazione delle zone a ridosso dell'interfaccia di saldatura. La quantità di materiale espulso in questa fase è bassa. Il flash subisce modeste variazioni, che riguardano essenzialmente la geometria degli angoli di innesto e dell'angolo mediano [4]. In fig. 2 sono rappresentate alcune delle grandezze geometriche richiamate.

Al termine di un processo di saldatura tubo contro tubo, che è poi identico a quello operato per saldare in un'asta di perforazione frizionata, il tubo al tool joint (fig. 1) il giunto presenta due caratteristici cordoni di bava, che chiameremo rispettivamente *flash interno* e *flash esterno* (fig. 3).

Nella aste di perforazione frizionate, il



Nelle prove effettuate nella fase sperimentale del presente lavoro la caratterizzazione meccanica è stata operata eseguendo, nel laboratorio del Dipartimento di Progettazione e Produzione Industriale del Politecnico di Bari, prove di trazione secondo le vigenti normative internazionali, di resilienza e microdurezza su provini estratti dai giunti da esaminare.

In particolare nell'esecuzione delle prime due prove:

- a) per quanto riguarda le prove di trazione, particolare cura è stata posta nella preparazione dei provini; perché la prova risultasse significativa è stata curata la perfetta simmetria del provino rispetto all'interfaccia di saldatura;
- b) le prove di resilienza sono state invece condotte eseguendo un intaglio a V in corrispondenza dell'interfaccia di saldatura.

La prova di microdurezza è stata invece svolta effettuando rilevazioni lungo la linea di mezzeria della parete del tubo, ricavando, per ciascuna giunzione, profili di microdurezza ottenuti ponendo in ascissa le distanze misurate, lungo la linea di mezzeria, a partire dall'interfaccia di saldatura con il minimo a -6 mm ed il massimo a +6 mm (fig. 2) ed in ordinata la

microdurezza Vickers.

Si presentano nel lavoro alcuni dei risultati che sono stati ottenuti nel corso di una campagna di prove sperimentali che il gruppo di ricerca ha svolto con saldature eseguite presso lo stabilimento della Colli Drill S.r.l. di Capena (Roma), teso alla ottimizzazione dei parametri di processo per la fabbricazione di aste di perforazione frizionate di uso commerciale.

In particolare esamineremo i risultati raccolti per le giunzioni che hanno presentato le migliori caratteristiche meccaniche e metallografiche.

Occorre precisare che le giunzioni, immediatamente dopo l'effettuazione della saldatura, sono state sottoposte ad un trattamento termico di rinvenimento in aria come quello praticato nel normale ciclo di produzione delle aste di perforazione frizionate che si attua nello stabilimento della Colli Drill.

Questo tipo di trattamento termico viene effettuato sia per migliorare la microstruttura evitando che si manifestino strutture di tempra, sia per annullare eventuali tensioni residue conseguenti alle sollecitazioni termiche dovute al processo di saldatura.

Nel programma generale di prove per ogni differente condizione di processo impiegata sono state effettuate tre replicazioni.

Le caratteristiche del materiale impiegato per le prove effettuate sono le seguenti:

- Tubi in acciaio tipo 42CrMo4;
- diametro esterno: $D_e = 76.1 \text{ mm}$
- spessore di parete del tubo: $WT = 6.3 \text{ mm}$

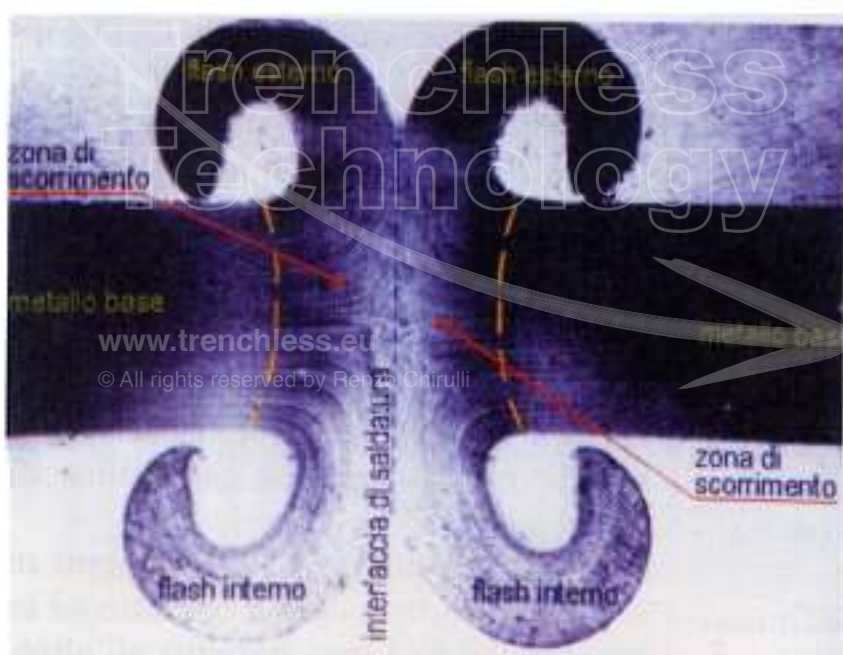


Figura 3

flash esterno viene rimosso durante il processo di fabbricazione.

L'analisi della configurazione geometrica del giunto risultante, e quindi in definitiva del flash interno, può fornire un gran numero di informazioni sui parametri di processo impiegati e quindi su certe caratteristiche meccaniche e metallurgiche del giunto correlate ai parametri stessi.

Caratteristiche meccaniche e metallografiche delle giunzioni

La caratterizzazione meccanica e metallografica delle giunzioni realizzate con tecnica di saldatura ad attrito costituisce riprova significativa della qualità delle giunzioni stesse.

Tab. I - Composizione chimica (% in massa) dell'acciaio dei tubi impiegati nei tests

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.41	0.25	0.67	0.010	0.004	1.03	0.22

Tab. II - Caratteristiche meccaniche dell'acciaio dei tubi impiegati nei tests (temperatura ambiente 26 °C)

Prova di trazione conforme alla UNI EN 10002/1		Prova di resilienza conforme alla UNI EN 10045/1
R_m N/mm ²	A_t %	KV 300/5 J
1070	18.6	25

Prove di trazione e resilienza. In fig. 4 sono mostrati i provini 86, 87 ed 88 rotti durante la prova di trazione. In nessun caso è stata osservata la rottura in corrispondenza dell'interfaccia di saldatura.

I risultati medi ottenuti nelle prove di trazione e resilienza sono riportati nella tabella seguente.

Tab. III -risultati delle prove di trazione e resilienza - valori medi sul set di provini che hanno fornito i migliori risultati sotto l'aspetto meccanico e metallografico. (nn. 86-87-88).

Prova di trazione conforme alla UNI EN 10002/1		Prova di resilienza conforme alla UNI EN 10045/1
R_m N/mm ²	A_t %	KV 300/5 J
1010	8.4	25.3

teristiche quali:

- metallo base
- zona di scorrimento
- interfaccia di saldatura
- flash esterno
- flash interno

Non si ritiene opportuno, dati gli obiettivi della presente memoria, entrare nell'esame dettagliato dei risultati forniti dall'analisi micrografica.

Risulta tuttavia utile osservare come le zone della giunzione presentino strutture ad elevata resistenza meccanica, del tipo sorbitico, in conseguenza anche del significativo trattamento termomeccanico subito

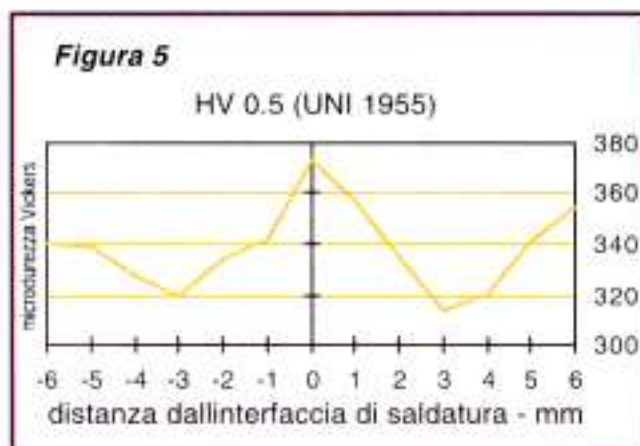
dal materiale nella zona d'interfaccia per le modalità del processo prima descritte.

Tale trattamento è conseguente all'azione meccanica (le pressioni applicate) esercitata a caldo in fase di forgiatura. In virtù delle strutture rilevate nelle varie zone caratteristiche identificate, si è riscontrata nell'interfaccia una resilienza pari o lievemente superiore a quella del metallo base.

Le caratteristiche del materiale utilizzato, che lo rendono estremamente suscettibile a prendere tempra, comporta il rischio di ottenere strutture fragili di tempra all'interfaccia, dovute alla elevata velocità con cui avviene il raffreddamento in tale zona, immediatamente dopo la saldatura.

Tale considerazione sottolinea l'importanza del trattamento termico post-saldatura.

Le strutture riscontrate nel flash, interno ed esterno, hanno scarsa importanza ai fini delle caratteristiche prestazionali delle aste in quanto il flash esterno viene rimosso, mentre quello interno non contribuisce significativamente alla resistenza del giunto.



Caratteristiche geometriche dei giunti saldati

In una saldatura ad attrito tubo contro tubo, il flash presenta una tipica forma a doppio ricciolo; in fig. 6 è mostrata una giunzione tubo contro tubo sezionata dopo la saldatura nella quale non è stato rimosso il flash esterno. In fig. 7 si riportano le sezioni metallografiche dei provini nn 86, 87 ed 88 impiegate per l'effettuazione delle macro e micrografie e per le prove di microdurezza.



Figura 6

Queste sezioni sono state sottoposte a

Figura 7



Figura 4

Profili di microdurezza. Il valore massimo si registra in corrispondenza dell'interfaccia di saldatura con 373 HV. La durezza del metallo base non saldato è pari a 342 HV.

Le prove evidenziate dimostrano che le caratteristiche della zona di saldatura sono paragonabili a quelle del metallo base.

Prove metallografiche. Per la caratterizzazione metallografica è stata condotta un'analisi micrografica mediante microscopio ottico.

Con riferimento alla fig. 3, nei giunti saldati ad attrito e non finiti sono generalmente riconoscibili 5 zone carat-

scansione ottica, con risoluzione di 1200 dpi. Dall'immagine bitmap così ottenuta è stata operata, via software, la vettorizzazione del contorno poi analizzato in ambiente CAD, dove è stato possibile misurare una serie di grandezze geometriche significative, quali (fig. 2):

- a) altezza del vertice di intaglio mediano - Δ ;
- b) angoli d'innesto destro e sinistro - indicati rispettivamente con δ_r e δ_l ;
- c) sezione trasversale del flash e delle porzioni destra e sinistra - indicati rispettivamente con S , S_r e S_l ;
- d) larghezza massima del flash e semi larghezze destra e sinistra - indicati rispettivamente con w , w_r e w_l ;
- e) altezze massime del flash destra e sinistra - indicati rispettivamente con h_r ed h_l .

Nella tab. IV sono raccolte le misure effettuate.

Tab. IV - caratteristiche geometriche dei flash esaminati.

grandezze geometriche		set provini (valori medi)
simbolo	u.m.	86-87-88
Δ	mm	1,72
δ_r	deg.	178,50
δ_l	deg.	172,63
S	mm ²	34,56
S_r	mm ²	17,53
S_l	mm ²	17,00
w	mm	11,59
w_r	mm	5,84
w_l	mm	5,75
h_r	mm	4,27
h_l	mm	4,22

I valori di alcune delle grandezze introdotte, sono in stretta relazione con i parametri di processo impiegati, ed in particolare con pressione di secondo livello di attrito e burn off.

Mantenendo costantemente pari a 2 il rapporto tra pressione di forgiatura e pressione di secondo livello di attrito e variando su tre differenti livelli tanto la pressione di secondo livello di attrito, quanto il burn off, è stata verificata una perfetta correlazione tra questi due parametri di processo (pressione di secondo livello di attrito e burn off) ed alcune delle grandezze geometriche introdotte, quali S , S_r , S_l e Δ .

A tale proposito è utile soffermarsi su alcuni aspetti che sono strettamente

legati alle informazioni che è possibile trarre dall'esame visivo del flash.

Se b rappresenta il burn off e fc il forge collapse, cioè l'accorciamento che si manifesta in fase di forgiatura, chiameremo TLL (Total Length Loss) l'accorciamento complessivamente subito dai componenti in saldatura: $TLL = b + fc$.

Detti D_e e D_i rispettivamente diametro esterno e diametro interno del tubo, allora:

$$V_i = TLL \cdot \frac{(D_e^2 - D_i^2)}{4} \pi$$

rappresenterà il volume di tubo espulso durante il processo di saldatura.

Nei test effettuati (provini nn. 86, 87 ed 88) sono stati utilizzati tubi con diametro esterno $D_e=76.1$ mm, diametro interno $D_i=63.5$ mm, impostando, come parametro di processo, un burn off pari a $b=8$ mm.

Registrando i valori di forge collapse per ciascun provino è stato calcolato V_i ovviamente risultato pari alla somma dei volumi del flash interno più quello esterno e verificato così il principio di conservazione della massa. I risultati sono raccolti nella tabella V.

Tab. V - volumi del metallo espulso.

n. prov.	f_c mm	TLL mm	V_i mm ³
86	2,7	10,7	14781,88
87	2,8	10,8	14920,03
88	2,7	10,7	14781,88

Ovviamente esiste una stretta correlazione tra TLL, volume complessivo dei flash e quindi sezione trasversale dei flash. L'importanza di quest'ultima grandezza, cioè della sezione trasversale del flash, è legata in massima parte alla significativa funzione che viene attribuita al burn off, a cui il TLL è, come già visto, strettamente legato.

Infatti a parità di pressioni di processo impiegate, a maggiori burn off corrispondono maggiori sezioni trasversali dei flash e quindi maggiori volumi di materiale espulso. Ciò implica una più profonda pulizia delle superfici sull'interfaccia di saldatura [2], in quanto un sufficiente burn off garantisce che impurità ed ossidi eventualmente presenti vengano espulsi. Se ciò non avvenisse, sarebbe possibile trovare al termine del processo, in corrispondenza dell'interfaccia di saldatura, inclu-

sioni costituite da impurità o particelle di ossido che costituirebbero possibili fonti di innesco di cricche durante l'esercizio del componente.

Tuttavia eccessivi valori del burn off possono condurre ad un incremento di ampiezza della zona termicamente alterata (HAZ - Heat Affected Zone), sia per la necessaria maggiore durata della fase di riscaldamento (secondo livello di attrito), sia per l'azione di preriscaldamento che il flash, richiudendosi ed adagiandosi alle pareti del tubo, può esercitare sulle parti di metallo situate in prossimità della interfaccia di saldatura.

Un altro importante parametro di processo legato alla sezione trasversale del flash è la pressione di secondo livello di attrito (e quindi la pressione di forgiatura). A parità di burn off, al crescere della pressione di secondo livello di attrito, decresce, anche se in bassa misura, la sezione trasversale.

La fig. 8 mostra la variazione della sezione trasversale del flash interno ottenuta variando, nel corso del programma generale di prove, la pressione di secondo livello di attrito su tre livelli per tre differenti valori del burn off. Si noti come a parità di burn off a differenti valori della pressione di secondo livello di attrito corrispondono valori della sezione trasversale del flash poco difforni tra loro. Da numerose esperienze, condotte anche da altri ricercatori ([1], [3]), è stato osservato che all'aumentare della pressione di secondo livello di attrito, mantenendo costante il burn off, diminuisce l'ampiezza della zona termicamente alterata; questo costituisce un indubbio vantag-

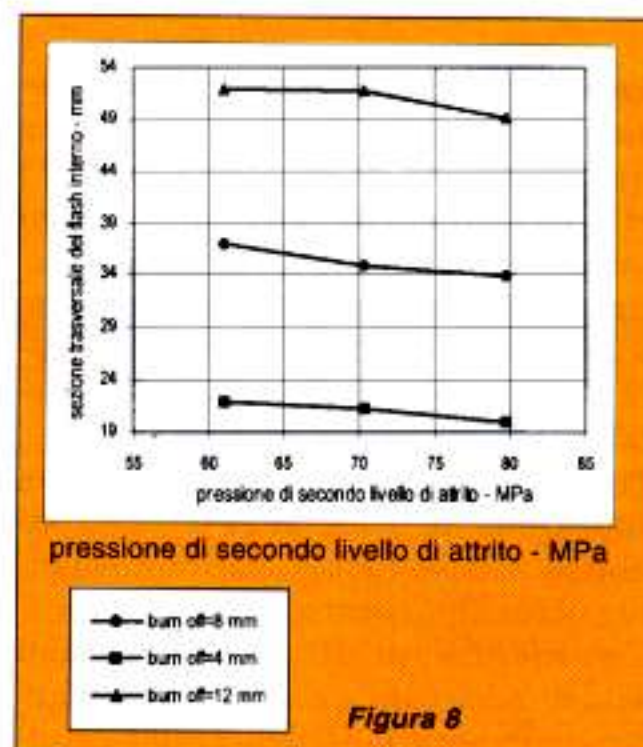


Figura 8

gio specie quando è da temersi, a causa del tipo di acciaio impiegato, la formazione di strutture di tempra.

In realtà va segnalato che talune condizioni al contorno, proprie di un processo di saldatura condotto in condizioni di produzione standard, possono influire in maniera determinante sui valori delle grandezze appena esaminate (sezione trasversale).

Un esempio è costituito dalla variabilità dimensionale (ad esempio sul diametro esterno e sullo spessore di parete del tubo) che i componenti in saldatura possono presentare a causa di tolleranze di fornitura ammissibili per il processo standard di produzione.

Queste piccole differenze dimensionali portano generalmente alla formazione di flash asimmetrici, che presentano cioè sezioni trasversali destra e sinistra non uguali tra loro.

Tuttavia a livello qualitativo è possibile affermare che processi di saldatura condotti con l'impiego di pressioni basse portano alla formazione di flash con forma più regolare ed uniforme, ed in generale più controllabile.

In fig. 9 è mostrata, in forma qualitativa, la variazione riscontrata nel corso delle prove, che subisce l'altezza del vertice di intaglio mediano al variare della pressione di secondo livello di attrito. L'importanza di Δ è data dal fatto che per determinati valori di tale grandezza possono temersi fenomeni di propagazione di cricche a partire dal vertice dell'intaglio mediano stesso.

In fig. 10 è mostrata la micrografia (128X) del vertice di intaglio mediano di uno dei campioni esaminati. La posizione e l'acutezza dello stesso non sono tali, in questo caso, da far temere fenomeni di rottura per fatica.

Occorre anzi sottolineare che perché

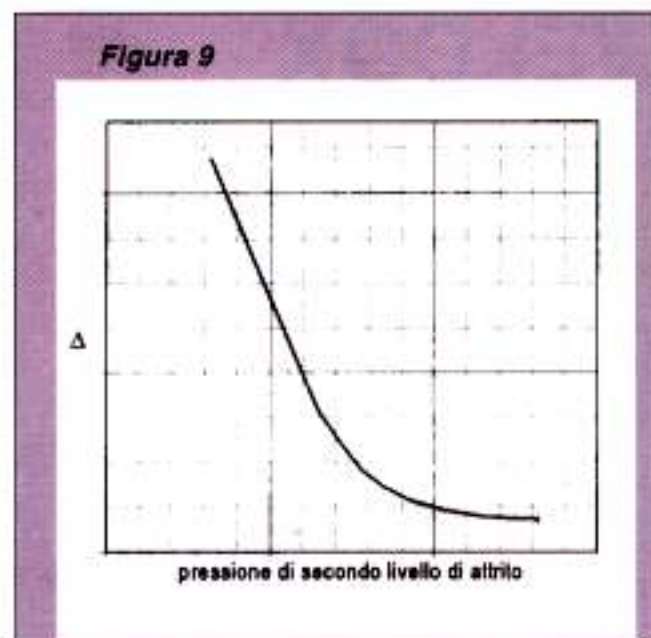


Figura 10

questi fenomeni si presentino è necessario che si verifichino due condizioni: a) che la giunzione e quindi la batteria di aste, sia sottoposta all'azione di sollecitazioni alternate di intensità e durata tali da far temere l'insorgere di fenomeni di fatica;

b) che il vertice di intaglio abbia dimensioni e posizione critiche.

La prima condizione può verificarsi quando una batteria di aste per perforazioni verticali devia dalla verticale o si inflette all'interno del perforo, oppure quando è sottoposta all'azione impulsiva di una massa battente fondo al foro (martelli down-hole). La rotazione della batteria inflessa causa l'inversione ciclica, tra il massimo ed il minimo, delle tensioni che interessano una data sezione trasversale della batteria stessa. Se in una data sezione, come potrebbe essere quella corrispondente ad una giunzione, si hanno zone tese e zone compresse, la rotazione fa sì che si verifichino nel materiale una serie di cicli di trazione-compressione. Se l'entità delle sollecitazioni agenti e quindi delle tensioni risultanti, nonché la durata di questa condizione di lavoro e quindi del numero di cicli sono tali da portare il materiale nel campo delle possibili rotture per fatica (si ricorda che il limite di fatica per un acciaio è generalmente pari al carico unitario di rottura moltiplicato per un fattore 0.40.5), allora si concretizza la prima delle condizioni necessarie perché possa aversi la rottura della giunzione.

Tuttavia perché questo avvenga non è sufficiente il verificarsi solo della prima condizione; è necessario infatti che si verifichi anche la seconda condizione e cioè che il vertice dell'intaglio mediano sia situato in posizione critica, molto prossima alla parete del tubo, ed abbia una dimensione critica. Il verificarsi di questa seconda condizione dipende da certi parametri di processo che se non opportunamente scelti possono dar luogo a prodotti non adeguati

alle caratteristiche richieste per l'impiego. Rimandando ad una successiva pubblicazione in via di stesura, per fornire una indicazione di massima importanza per l'utente, si sottolinea che la prova sul campo delle aste prodotte secondo le condizioni ottimali descritte (in nove mesi di esercizio continuo) ha fatto rilevare un eccellente comportamento senza alcuna rottura.

Conclusioni

La saldatura ad attrito costituisce certamente una tecnica dotata di notevoli ed evidenti vantaggi rispetto alle altre tecniche di saldatura utilizzate nel campo specifico della fabbricazione delle aste di perforazione.

I risultati ottenibili sono significativi in termini di caratteristiche meccaniche delle giunzioni; tuttavia è necessario che nell'applicazione di questa tecnica si porti particolare attenzione verso gli aspetti termo-meccanici del processo stesso che, se non opportunamente compresi e controllati, possono portare alla realizzazione di giunzioni cedevoli con la conseguente rottura del componente. La possibilità di identificare e comprendere taluni semplici caratteri geometrici e meccanici delle giunzioni saldate ad attrito consente però di riconoscere possibili errate condizioni di processo e quindi operare la scelta del prodotto migliore sulla base di elementi certi ed analizzabili.

Bibliografia

- [1] K.G.K. Murti, S. Sundarresan - "Thermal behavior of austenitic-ferritic transition joints made by friction welding" - Welding Journal - Dec. 1985.
- [2] S.D. Bhole - "Interface properties in friction welding: a technical note" - Welding Journal - Jul. 1991.
- [3] G.P. Rajamani, M.S. Shunmugam, K.P. Rao - "Parameter optimization and properties of friction welded quenched and tempered steel" - Welding Journal - Jun. 1992.
- [4] Chirulli R. - "La saldatura ad attrito nella fabbricazione di aste di perforazione per applicazioni nelle opere di ingegneria civile" - Quarry & Construction - Marzo 1996. ■

Ringraziamenti.

Vivissimi ringraziamenti per la collaborazione e l'aiuto reso per la realizzazione del lavoro svolto vanno rivolti alla Colli Drill S.r.l. di Capena (Roma) ed in particolare ai Sigg. Elio e Massimo Colli, e all'Ing. Armando Valentini.