

LA SALDATURA AD ATTRITO NELLA FABBRICAZIONE DI ASTE DI PERFORAZIONE

per applicazioni nelle opere di ingegneria civile

Renzo Chirulli*

1. Introduzione

Nel complesso delle attrezzature necessarie alla effettuazione di lavori di perforazione, le aste dette appunto di perforazione o drill pipes, rappresentano un componente caratterizzato da un elevato grado di criticità, dovuto essenzialmente agli alti costi che possono essere connessi con la rottura di un tale componente e che sono rappresentati, a seconda del tipo di lavoro in esecuzione, da una o più delle voci seguenti:

- costo dell'utensile fondo foro e della batteria lato fondo, persi;
- costo dell'eventuale recupero (quando possibile);
- costo legato allo spostamento dell'impianto di cantiere (per siti estesi);
- costo legato alla perdita del sito (per siti molto localizzati).

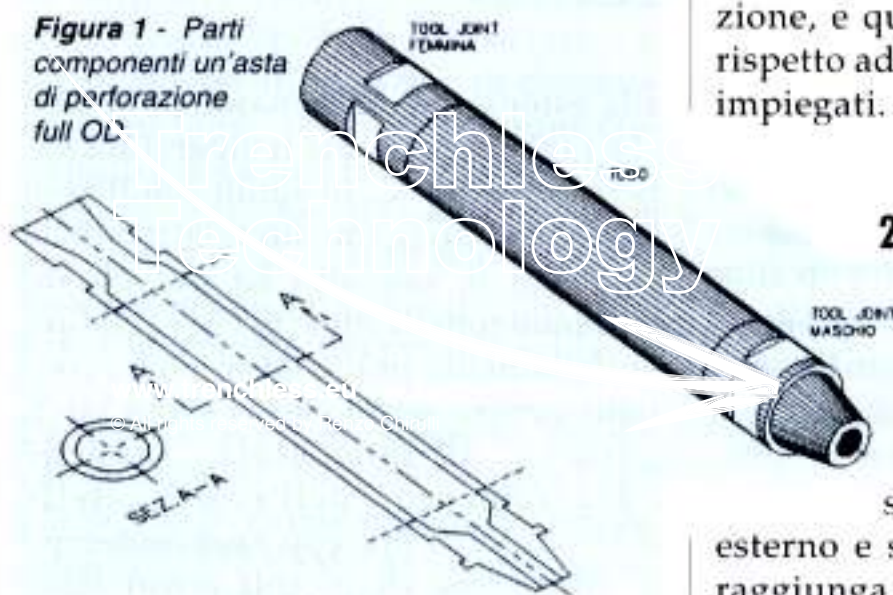
In Italia il mercato delle aste di perforazione è abbastanza eterogeneo, ed i prodotti offerti alle imprese, tanto dai produttori, quanto dalle numerose strutture commerciali esistenti, sono quanto mai variabili per sia per qualità dei costituenti e dei materiali impiegati che per tipologia e tecnologia costruttiva.

* Ingegnere libero professionista consulente per l'area produzione della Colli Drill Srl Capena (Roma)

La mancanza di precisi standards di riferimento ha contribuito a creare molta confusione rispetto a quelli che dovrebbero essere i parametri tecnici utili per la scelta del prodotto ideale rispetto al tipo di applicazione alla quale le aste di perforazione sono destinate.

Un altro elemento che differenzia so-

Figura 1 - Parti componenti un'asta di perforazione full OD



stanzialmente un tipo di asta di perforazione rispetto ad un altro è la tecnica costruttiva impiegata, ed in particolare la tecnica di giunzione *tubo-tool joint*. La fig. 1, riproduce schematicamente un'asta di perforazione standard del tipo *full OD*. Essa è costituita da tre elementi distinti:

- tool joint maschio (*pin*)
- tool joint femmina (*box*)
- tubo (*pipe*)

Questi elementi possono essere giuntati tra di loro con tecniche diversissime.

Questo aspetto, con l'introduzione della saldatura ad attrito, è divenuto fortemente caratterizzante rispetto alle capacità resistenziali che un'asta di perforazione può manifestare in opposizione alle sollecitazioni a cui essa viene assoggettata durante l'impiego.

Oggetto della presente memoria è appunto illustrare quali siano le caratteristiche peculiari di tale metodo di giunzione, e quali le differenze essenziali rispetto ad altri metodi correntemente impiegati.

2. La saldatura ad attrito

La saldatura ad attrito rientra tra i metodi di saldatura così detti *autogeni*. Essa ha luogo senza che vi sia apporto di materiale esterno e senza che il materiale base raggiunga la fase liquida (fusione). La giunzione, con questa tecnica, viene realizzata per forgiatura, ovvero i due pezzi da giuntare vengono premuti l'uno contro l'altro, con pressioni sufficientemente elevate da generarne l'unione. Con i materiali generalmente impiegati per la fabbricazione delle aste di perforazione, quali gli acciai, perché la giunzione possa realizzarsi impiegando pressioni di entità tecnologicamente realizzabili, è necessario portare i pezzi da giuntare ad una temperatura sufficientemente elevata (per molti degli acciai impiegati siamo nell'ordine dei 1300 °C). Il calore necessario al raggiungimento della tem-

peratura di forgiatura, viene allora ottenuto attraverso i fenomeni di attrito (da qui il nome di "Friction Welding Technique") che si generano quando le superfici a contatto, dei pezzi da giuntare, vengono poste in moto relativo l'una rispetto all'altra, applicando nel contempo una certa *pressione di contatto*.

Questo è possibile, per esempio, bloccando il tool joint in un mandrino solidale ad un albero motore in rotazione, ed il tubo in una morsa fissa (fig.2). Il lavoro all'albero motore, quando i pezzi sono in mutuo contatto sotto una data pressione, si trasforma nella maggior parte in calore, parte del quale viene speso per generare l'incremento di temperatura del metallo nella zona di saldatura e parte invece ceduto al metallo adiacente, alla macchina e verso l'ambiente, principalmente per conduzione ed irraggiamento.

Sul principio base appena descritto sono state sviluppate due alternative tecniche di saldatura ad attrito:

- la tecnica a moto o potenza continua (*continuous drive*);
- la tecnica ad inerzia (*inertia welding*).

La prima tecnica è quella che in Europa ha avuto il maggiore sviluppo, ed è quella della quale si parlerà nel seguito.

La seconda è invece la tecnica maggiormente studiata ed impiegata negli Stati Uniti.

Non costituisce oggetto della presente memoria l'esame delle differenze tra le due tecniche menzionate, che peraltro, occorre dire, sono sostanziali.

Accanto a queste, grazie alle possibilità offerte dalle saldatrici ad attrito dell'ultima generazione, è possibile operare con tecniche ibride, in cui al moto continuo può integrarsi una fase inerziale, conferendo ai giunti particolarissime caratteristiche.

Una schematizzazione della tecnica a potenza continua è quella che articola il processo in tre fasi principali:

- I) pulitura delle superfici da giuntare o *primo livello di attrito* (first friction stage)
- II) fase di riscaldamento o *2° livello di attrito* (second friction stage)
- III) fase di forgiatura (forge phase)

Nella prima fase, tool joint e tubo, vengono accostati e quindi posti in moto relativo (ad esempio rotativo), con pressioni di contatto relativamente basse e per un tempo abbastanza ridotto (3+5 s). In tali condizioni il riscaldamento prodotto è trascurabile, se rapportato



Figura 2 - Schema di saldatrice ad attrito.

alla estensione delle masse di acciaio che raggiungono una temperatura superiore ai 600 °C. In simili condizioni l'azione di sfregamento relativo delle superfici in contatto ha per effetto l'ottenimento di superfici in saldatura perfettamente pulite ed in pieno contatto ovvero senza che vi siano vuoti gassosi all'interfaccia, nonché l'azzeramento dell'entità delle macroasperità presenti e nel contempo la correzione di piccoli errori (fino all'1%) di ortogonalità dei tagli (fig.3); vengono inoltre vaporizzati depositi di acqua, olio o vernici eventualmente presenti. Anche gli ossidi, se presenti

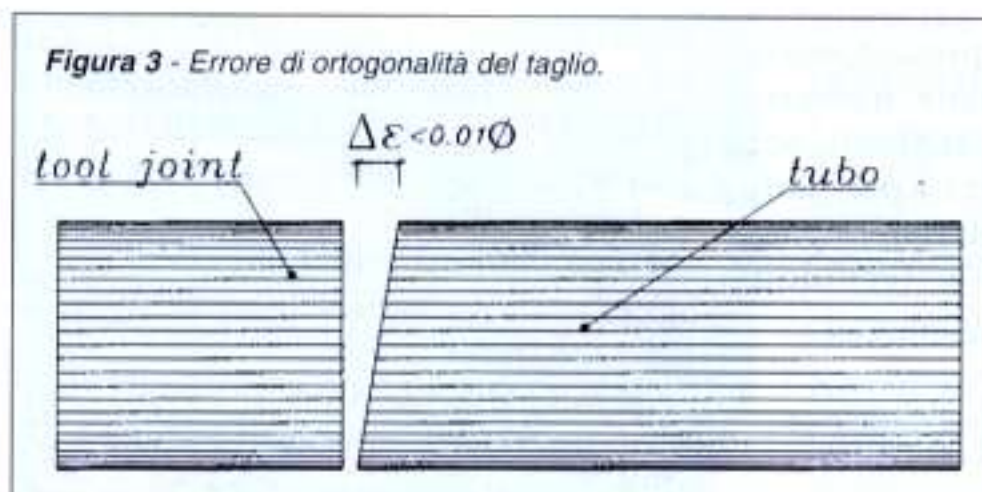


Figura 3 - Errore di ortogonalità del taglio.

in quantità non rilevanti, vengono parzialmente eliminati in questa fase.

La seconda fase, detta di riscaldamento o secondo livello di attrito, è forse quella più importante in quanto caratterizza la tecnica, influenzando fortemente l'esito e la qualità della saldatura.

In questa fase, nella quale i pezzi sono ancora in moto rotatorio relativo, le pressioni di contatto, dette *pressioni di 2° livello di attrito*, vengono incrementate verso valori opportuni, fortemente variabili, a parità di velocità di rotazione, in funzione della qualità del materiale impiegato e della geometria dei pezzi.

Fattori rilevanti sotto questo aspetto sono:

a) la composizione chimica e le caratteristiche tecnologiche dei materiali da saldare (principalmente la resistenza meccanica e quindi la durezza);

b) la presenza di strati superficiali molto duri (conseguenti, ad esempio, ad un trattamento termochimico);

c) la geometria dei pezzi ed in particolar modo dei tool joints, con riguardo alla distribuzione delle masse di acciaio adiacenti alla interfaccia di saldatura.

Non è quindi significativo esprimere dei valori particolari delle pressioni di 2° livello di attrito, che comunque vanno rapportate anche all'entità della velocità periferica di moto delle aree a contatto in corrispondenza dell'interfaccia di saldatura, che, a parità di velocità angolare, dipende, come è ovvio, dal diametro dei componenti. Questo parametro può essere stabilito solo attraverso una scrupolosa fase di sperimentazione che ne individui il valore ottimale, sia rispetto alla qualità delle giunzioni realizzate (in termini di resistenza alle sollecitazioni statiche e dinamiche e quindi a fenomeni di fatica) sia rispetto alla economicità del

processo di fabbricazione.

Nel corso dei test condotti preliminarmente alla fabbricazione di una serie standard di aste di perforazione, realizzate nello stabilimento della Colli Drill S.r.l. di Capena (Roma), sono state

impiegate pressioni di 2° livello di attrito variabili tra i 50 ed i 70 MPa.

La fase di 2° livello di attrito è caratterizzata oltre che dalla pressione di contatto anche dalla sua durata o, in relazione diretta, dall'accorciamento assiale che interessa i componenti in saldatura.

Avviene infatti che per effetto del calore prodotto per attrito all'interfaccia, la temperatura raggiunga valori che, per i materiali sottoposti a prova, oscillano attorno ai 1300 °C. A partire dall'interfaccia di saldatura la distribuzione della temperatura, lungo l'asse dei componenti, è caratterizzata da forti gradienti termici. Ai vari livelli di temperatura corrispondono stati di consistenza del materiale fortemente variabili, con variazioni altrettanto sensibili delle corrispondenti tensioni al limite della deformazione plastica. In prossimità della interfaccia di saldatura, l'acciaio si trova in uno stato plastico altamente deformabile, per cui anche sotto l'azione di carichi di limitata entità ed a carico costante, hanno luogo notevoli dislocazioni di materiale che viene espulso radialmente formando la così detta *bava di saldatura* o semplicemente *flash*, caratteristico proprio di tale tecnica.

Man mano che metallo caldo e plastico viene espulso, formando il flash e disperdendo calore, nuovo metallo si porta in zona di attrito dove, raggiunto uno stato altamente plastico, viene espulso. L'accorciamento assiale subito dai componenti prende il nome di *burn-off*.

Nelle prove condotte si è ritenuto opportuno controllare i burn-off, piuttosto che le durate della fase di 2° livello di attrito, in quanto il controllo del burn-off rappresenta una parametrizzazione del processo in grado di aumentarne il grado di ripetibilità rispetto a quello ottenibile attraverso una parametrizzazione basata sulla durata della fase di 2° livello di attrito, essendo questa fortemente influenzata da molte condizioni al contorno, alcune delle quali, come ad esempio la normale variabilità delle caratteristiche meccaniche in una stessa partita di acciaio, o le condizioni iniziali delle superfici a contatto, hanno, entro certi limiti, scarsa influenza sulla qualità finale delle giunzioni.

L'ottenimento di un opportuno valore

del burn-off porta al conseguimento di due importanti risultati:

a) *ottimizzazione del bilancio termico pre-forgiatura;*

b) *convogliamento verso l'interfaccia di saldatura di materiale opportunamente pulito e non contaminato e concomitante espulsione di materiale non pulito, ossidi ed altre impurità presenti sulle superfici*



Figura 4 - Fase di 2° livello di attrito. Formazione del flash.

iniziali di contatto.

Insufficienti burn-off, e quindi basse durate, non garantiscono un sufficiente riscaldamento ed una profonda pulizia del materiale in corrispondenza della interfaccia di saldatura. Di contro burn-off eccessivi, e quindi eccessive durate, possono portare a surriscaldamenti del materiale con conseguente ingrossamento del grano cristallino e decadimento delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio posto in prossimità della zona di saldatura, oltre a portare ad un consumo, oltre misura conveniente, dei pezzi in saldatura.

Dalle prove condotte è emerso che un valore ottimale del burn-off, per l'applicazione in esame e con il materiale impiegato (42 CrMo 4), debba essere pari circa ad 1.1 volte lo spessore di parete del tubo.

La fase di 2° livello di attrito ha termine quando si raggiungono la durata o il burn-off impostati.

A questo punto la rotazione viene bruscamente arrestata e quando la velocità di rotazione si annulla completamente, si incrementa la pressione di contatto a valori sufficienti a produrre la giunzione dei due pezzi, realizzando la *forgiatura*.

Interrompendo il processo poco prima che abbia inizio la forgiatura, non si apprezza alcuna giunzione significativa tra i pezzi.

I parametri fondamentali della fase di forgiatura sono:

- pressione;
- durata;
- accorciamento assiale registrato in questa fase, detto *collasso di forgiatura*.

La pressione di forgiatura deve essere sufficiente a produrre la formazione di legami stabili, lungo l'interfaccia di saldatura, producendo, nel contempo, grazie alla lavorazione meccanica a caldo che ha luogo, una raffinazione del grano. Nel corso delle prove condotte ottimi risultati sono stati ottenuti impiegando valori della pressione di forgiatura circa *doppi* rispetto a quelli impiegati nella fase di 2° livello di attrito.

La durata della forgiatura va invece stabilita in relazione alla dimensione e geometria dei pezzi da saldare essendo legata a fenomeni di carattere essenzialmente termico. In altri termini tale durata deve essere sufficiente a produrre un raffreddamento dei pezzi al di sotto circa dei 600÷700 °C, in modo che i legami appena creati, grazie all'azione della pressione applicata, restino stabili. Per l'applicazione in esame i valori possono variare tra i 4 ed i 6 secondi.

Il collasso di forgiatura rappresenta, infine un parametro essenziale, che insieme con la pressione applicata, possono avere una enorme influenza sulla qualità della giunzione. In realtà il collasso di forgiatura più che un parametro rappresenta un risultato del processo essendo strettamente legato alla pressione di forgiatura ed allo stato di consistenza del materiale e quindi alla temperatura raggiunta (o più correttamente al campo termico che si instaura nell'intorno della interfaccia di saldatura). Costituisce però un dato di controllo essenziale e di immediata lettura, attraverso cui è possibile stabilire se una giunzione sia o meno da considerarsi affidabile. Sulla base delle prove condotte risulta che un valore di soglia, sufficientemente affidabile del collasso di forgiatura, possa essere pari al burn-off moltiplicato per un fattore 0.38÷0.40.

Ultimata la fase di forgiatura, viene eseguita la rimozione del flash esterno, mediante un opportuno utensile da taglio. Questa operazione è molto importante perché il flash può presentar-

si in certe configurazioni critiche (fig.5), specie per i processi male controllati, dando origine a punti (intagli critici) in cui possono manifestarsi inneschi alla frattura, specie in presenza di sollecitazioni alternate.

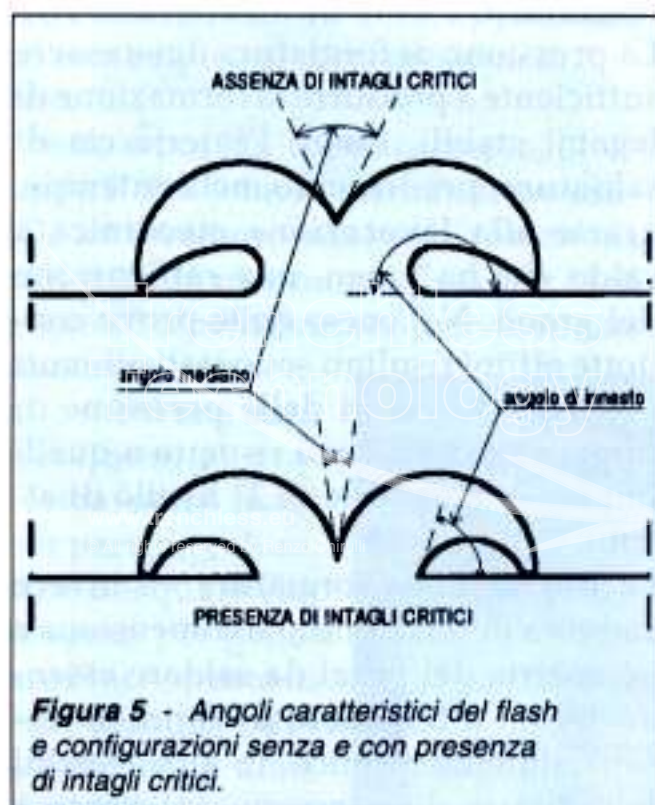


Figura 5 - Angoli caratteristici del flash e configurazioni senza e con presenza di intagli critici.

La rimozione del flash deve quindi essere condotta avendo riguardo a che non restino gradini o intagli dove possano verificarsi pericolosi accumuli di tensione.

Alcuni produttori ritengono che rimuovere il flash lasciando un risalto apprezzabile in corrispondenza di esso (fig.6) porti ad un aumento di resistenza della giunzione. In realtà l'incremento di resistenza della giunzione, conseguente all'aumento della sezione resistente, è trascurabile, non lo è invece il pericolo che, in corrispondenza del gradino rimasto, specie quando si individuino degli intagli critici, possano verificarsi pericolosi accumuli di tensione con inneschi di cricca.

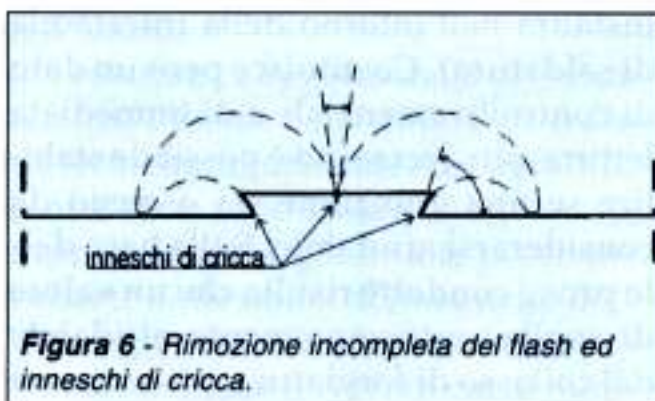


Figura 6 - Rimozione incompleta del flash ed inneschi di cricca.

La situazione è molto meno critica per il flash interno, difficilmente soggetto a trazioni alternate a compressioni durante la rotazione della batteria di aste, e comunque non soggetto alle tensioni normali in grado di estremo. Inol-

tre la resistenza del metallo, proprio in corrispondenza della giunzione, grazie al raffinamento del grano cristallino che ha luogo durante la forgiatura, è molto spesso più elevata di quella del metallo base, per cui la sezione di giunzione, a parità di spessore, è comunque più resistente del tubo.

Oltre al processo propriamente di saldatura, non poca importanza riveste il trattamento termico post-saldatura, dal quale possono dipendere gran parte delle caratteristiche prestazionali della giunzione, specie quando si impieghino acciai ad alta resistenza. Limitandosi ad un breve accenno, basta sottolineare, avendo a mente le curve di rinvenimento di un acciaio come quello impiegato (fig.7) che anche variazioni relativamente piccole della temperatura di trattamento, possono condurre a variazioni sensibili della resistenza meccanica, della durezza e della tenacità dell'acciaio, e quindi un trattamento termico opportunamente studiato, una volta impostato, va eseguito con metodiche che siano quanto più possibile controllabili e ripetibili.

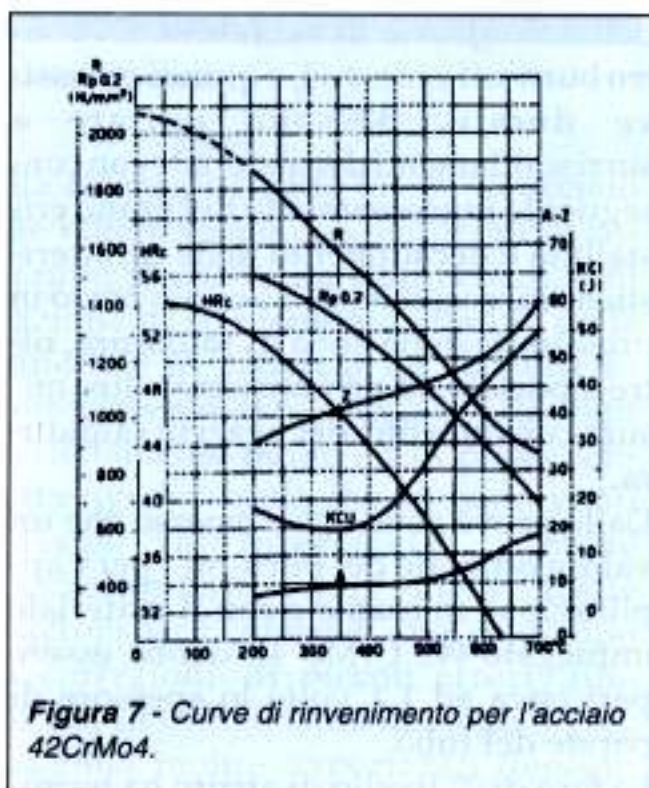


Figura 7 - Curve di rinvenimento per l'acciaio 42CrMo4.

3. Caratteristiche prestazionali delle aste di perforazione frizionate

In relazione all'impiego, le aste di perforazione frizionate offrono delle caratteristiche prestazionali che le pongono senz'altro al di sopra di qualsiasi altra tipologia realizzativa. Il motivo è legato essenzialmente a tre aspetti fondamentali:

1 - alta resistenza meccanica delle giunzioni realizzate conseguente a:

- 1.1. ridotta ampiezza della zona termicamente alterata (HAZ - Heat Affected Zone);
- 1.2. assenza pressoché totale di difetti o inclusioni;
- 1.3. grano cristallino esente da ingrossamento;
2. monoliticità delle giunzioni
3. alta ripetibilità delle fasi di processo e quindi del livello qualitativo.

Il primo degli aspetti fondamentali richiamati richiederebbe un approfondimento a se stante che non è possibile sviluppare nella presente memoria; per questo motivo in questa sede verranno chiariti unicamente gli aspetti legati alla monoliticità delle giunzioni ed alla alta ripetibilità delle fasi di processo e quindi del livello qualitativo.

Con monoliticità della giunzione si intende che tutta la sezione del componente (in questo caso del tubo) è soggetta a giunzione, e che questa presenta caratteristiche costanti lungo tutta l'area. Se pensiamo ad esempio alle aste costruite saldando i tool-joints al tubo mediante saldatura ad arco a filo continuo (un prodotto, questo, altamente diffuso sul mercato delle attrezzature di perforazione) si capisce subito cosa si intenda per monoliticità.

Per realizzare la saldatura a filo continuo, si ricorre generalmente all'uso di tool-joints che presentano nella zona di giunzione o un innesto a boccia che va ad incastrarsi all'interno del tubo, talvolta con forzatura a caldo, o un innesto filettato tronco-conico o cilindrico, maschio, che va ad avvitarsi in un innesto filettato, femmina, ricavato nella parete del tubo. La saldatura viene eseguita in una opportuna gola tra parete esterna del tool-joint e tubo, con materiale di apporto allo stato fuso. Una simile giunzione rivela i suoi limiti, nel campo di impiego esaminato, in quanto presenta una minore resistenza alle sollecitazioni alternate, una minore resistenza all'usura (il cordone di saldatura, in risalto rispetto alle pareti dell'asta, entra per primo in contatto con le pareti del perforo, con ovvi problemi legati alla più rapida usura del cordone stesso rispetto alle altre parti componenti l'asta e conseguente rottura della giunzione e quindi dell'asta, prima che questa abbia raggiunto un accettabile e visibile stato di usura generale). Inoltre le lavorazioni operate

per innestare il tool joint al tubo, prima della saldatura, indeboliscono i componenti stessi o impongono stati di coazione che possono generare la rottura delle aste anche con sollecitazioni esterne relativamente basse se raffrontate alla capacità resistenziale della sezione resistente. Non è infatti infrequente che questo tipo di aste si rompano sul tubo immediatamente al di sotto dell'innesto del tool-joint.

L'altro aspetto che differenzia fortemente le aste di perforazione frizionate, rispetto alle altre tipologie costruttive, è, come si è detto, l'alta ripetibilità delle fasi di processo e quindi del livello qualitativo raggiungibile che caratterizza la tecnica di saldatura ad attrito, incrementato oltretutto dagli elevati gradi di controllo, sui parametri di saldatura, che le moderne saldatrici ad attrito sono capaci di implementare, attraverso complessi sistemi costituiti da sensori collegati e controllati da computer attraverso interfacce logiche. Questo consente di restringere fortemente le escursioni ammissibili dei parametri di processo, registrati saldatura dopo saldatura, limitando di conseguenza le escursioni ammissibili del livello qualitativo delle giunzioni stesse, ciò che, con le tecniche tradizionalmente utilizzate in questo settore, risulta praticamente irrealizzabile. Inoltre, fatta esclusione per gli acciai ad alto tenore di carbonio, la saldatura ad attrito consente l'accoppiamento di materiali variabili in un campo molto esteso, ed inoltre le caratteristiche delle giunzioni non sono evidentemente influenzate da quelle di materiali esterni di apporto come invece avviene per la saldatura a filo continuo. Ciò consente una ottimizzazione della scelta dei materiali costituenti tool-joints e tubo, che può essere quindi operata soprattutto in relazione alle differenti caratteristiche prestazionali che si richiedono per tali differenti componenti.

Questa breve analisi, introduttiva rispetto ai risultati di ricerche tuttora in corso nel settore specifico, porta ad un risultato che per molti versi potrebbe apparire scontato, dal momento che le aste di perforazione frizionate si stanno giustamente imponendo all'attenzione degli utenti. Tuttavia essa offre senz'altro molteplici elementi di riflessione utili oltre che per il campo di ricerca specifico anche per la comprensione di quali siano gli aspetti più significativi che occorre considerare nell'operare una scelta tra prodotti apparentemente simili. ■