

PLASMA: È L'ERA DELL'ALTA DEFINIZIONE

A partire dalle prime installazioni che risalgono in Italia agli anni '80, il taglio al plasma si è guadagnato la fama di una lavorazione molto efficiente ed economica. E' sufficiente, infatti, sfogliare un manuale di istruzioni di un sistema di taglio ad arco plasma per verificare la gamma dei materiali lavorabili (acciai a basso tenore di carbonio, acciai inossidabili, leghe di alluminio e rame), le profondità di taglio raggiungibili (fino a 50 mm) e le elevate velocità di avanzamento della torcia (ad esempio per gli acciai inox il range di velocità varia da 5000 mm/min, per bassi spessori, fino a 180 mm/min, per spessori oltre i 50 mm).

- Il taglio plasma tradizionale automatizzato si è sviluppato nei seguenti campi applicativi: taglio di lamiere metalliche di piccolo e medio spessore (fino a 5 mm) in acciaio al carbonio, inox e alluminio per l'industria dei trasporti e l'industria del condizionamento ambientale;
- taglio di lastre di elevato spessore (da 5 fino a 100 mm) nel settore della movimentazione terra e della movimentazione pesante, nell'industria navale e nella lavorazione di recipienti in pressione;
- taglio contornato di tubature e corpi cilindrici, smaterozzatura, esecuzione di tagli inclinati e di scanalature a profondità controllata.

La lavorazione ottenuta con un sistema plasma tradizionale si connota tuttavia non solo per l'elevata efficienza dell'operazione (in termini di tempi e costi di operazione) ma anche per la scarsa qualità e precisione del taglio, che comporta molto spesso la successiva lavorazione dei bordi (fig.1).

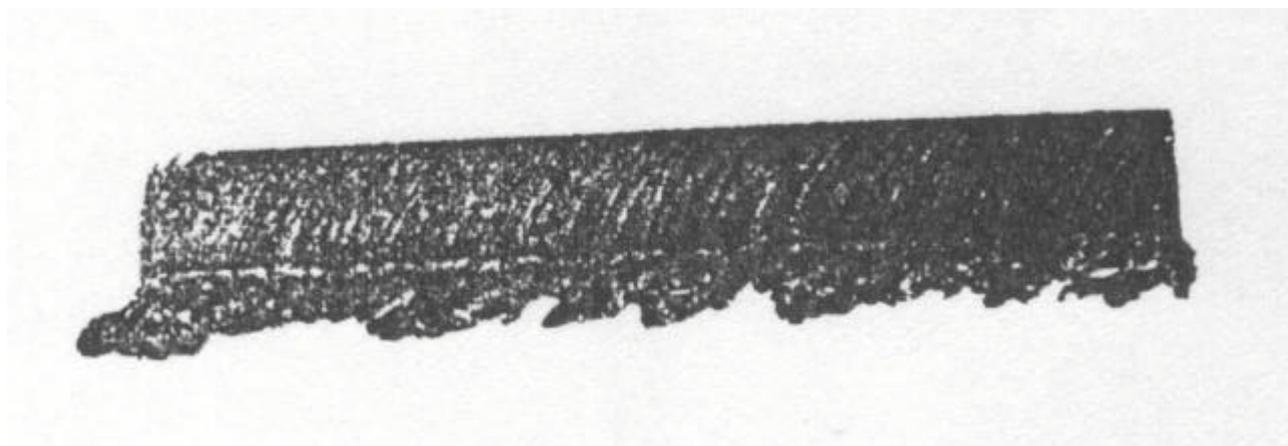


Fig. 1 – Campione di acciaio inox (spessore 6 mm) tagliato con plasma convenzionale ad aria

Con l'introduzione del plasma ad alta definizione (High Definition Plasma, HDP) si assiste a un miglioramento significativo della qualità di taglio (contorni netti, bordi che non presentano bave, limitata estensione della zona termicamente alterata e bordo sufficientemente squadrato). Il taglio plasma ad alta definizione, nato come miglioramento di una tecnologia preesistente, in parte ha sostituito, soprattutto nelle lavorazioni di bassi spessori, il taglio plasma tradizionale. Tuttavia, dati i significativi risultati ottenuti, viene utilizzato nel taglio dei metalli non solo con il semplice scopo di separare due parti (per permetterne la successiva lavorazione) ma per l'ottenimento di buone qualità superficiali e macrogeometriche. Il taglio HDP

si è esteso anche, al settore affine del taglio in lastra near net shape (ovvero che non necessita di successive lavorazioni), soprattutto per la lavorazione di acciai al carbonio, inox e leghe di alluminio, al punto da divenire concorrenziale con le altre tecnologie non convenzionali di taglio di buona qualità, tra le quali principalmente il laser e il getto idroabrasivo.

IL PLASMA

Poiché il numero di cariche naturalmente presenti in un gas a temperatura ambiente (in aria indicativamente 10^6 elettroni al m^3), soggetto a una differenza di potenziale, non è sufficiente per registrare il passaggio di corrente, il comportamento del gas può essere assimilato a quello di un dielettrico.

Se si fornisce energia, sotto forma di calore, scariche elettriche od onde elettromagnetiche, alle molecole e agli atomi che costituiscono il gas si ottiene come risultato dapprima la scissione delle molecole in atomi e successivamente la ionizzazione dell'atomo, che si separa nei componenti fondamentali ioni ed elettroni. Al crescere dell'intensità dell'energia fornita al gas cresce il numero delle cariche libere all'interno del gas, fino al raggiungimento della completa ionizzazione. Questa miscela di ioni, elettroni, atomi e particelle neutre ad alta energia interna e cinetica, fortemente conduttrice di corrente e sensibile ai campi magnetici, costituisce il plasma, altrimenti detto *quarto stato della materia*. Il plasma, contrariamente ai gas, è un ottimo conduttore elettrico: se interposto tra due elettrodi a differente potenziale chiude il circuito elettrico e trasporta cariche.

Nella ionizzazione mediante scarica ad alta frequenza (uno dei metodi più efficaci per ottenere plasma in atmosfera) un campo elettrico alternato è applicato tra due elettrodi lambiti da un gas. Le cariche, naturalmente presenti nel gas neutro, sono sufficienti alla rottura del dielettrico (*break-down*). Il circuito elettrico che si stabilisce tra i due poli dà origine al fenomeno della *scarica elettrica*: gli elettroni presenti nel gas, accelerati dal campo in seguito alla rottura del dielettrico, urtano le particelle neutre e strappano altri elettroni dalla corteccia atomica (*effetto valanga*). Una volta ionizzato il gas, è sufficiente un campo elettrico a bassa tensione e corrente continua per impedirne il ritorno alla neutralità. Il fascio di plasma si dimostra un efficace utensile ad elevata energia specifica nel trasferimento dell'energia termica da una sorgente di potenza elettrica alla superficie del pezzo (tab.1).

| TAB. 1 – DENSITA' ENERGETICA DEI PRINCIPALI FASCI [1] | | | | |
|---|-------------------|------------------|---|-----------------------|
| Sorgente | | Temperatura (°K) | Densità energetica (W/cm ²) | Potenza d'output (kW) |
| Fiamma (ossiacetilenica) | | 3000 | | |
| Plasma | Arco in atmosfera | 10000 | 10^4 | 50 |
| | Plasma jet | 20000 | 10^5 | 200 |
| | Fascio plasma | 30000 | $5 \cdot 10^5 - 10^6$ | 500 |
| Fascio laser | | | $10^6 - 10^9$ | 50 |
| Fascio di elettroni | | | 10^6 | 300 |

SISTEMI DI TAGLIO PLASMA

Le lavorazioni mediante plasma storicamente discendono dalla saldatura TIG in seguito all'inserimento di un ugello costringitore tra elettrodo e pezzo in lavorazione, responsabile dell'aumento della temperatura (oltre i 30.000 °K nella parte interna del fascio) e quindi della densità energetica trasmessa alla superficie in lavorazione.

Il fascio plasma viene generato e movimentato mediante una torcia, costituita essenzialmente dai seguenti elementi (fig. 2):

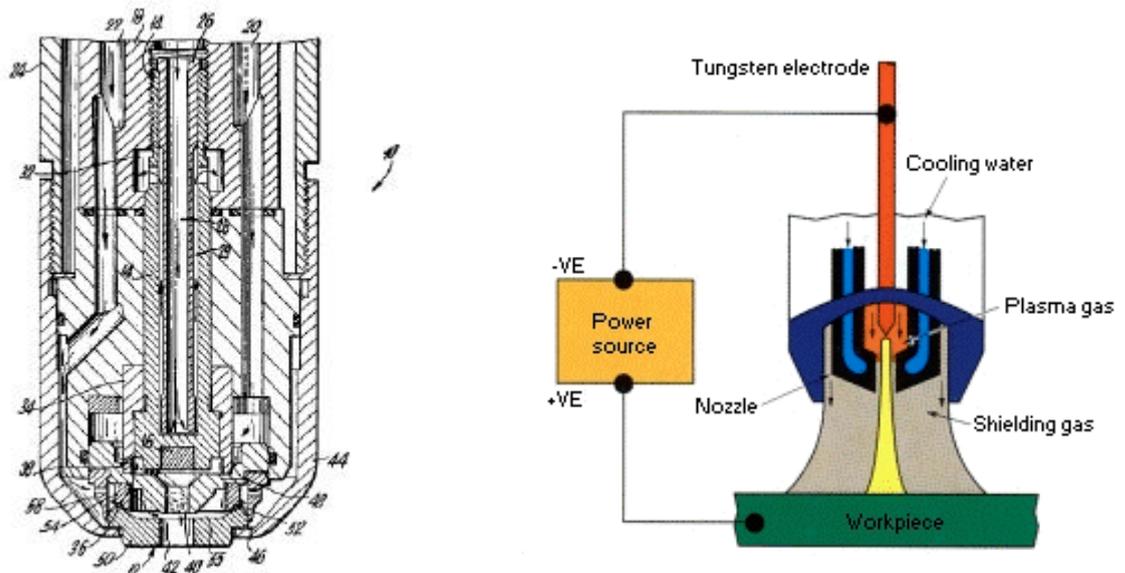


Fig. 2 – Componenti torcia al plasma e funzionamento

- **Elettrodi: catodo e anodo**

Il catodo funge da emettitore termoionico nonché da punto di innesco dell'arco. Per le alte temperature a cui è sottoposto è costituito da leghe di tungsteno (temperatura di fusione 3380 °C), tungsteno toriato (tungsteno con piccole quantità di ossido di torio per aumentarne l'emissività elettronica), zirconio (meno sensibile e reattivo ai gas attivi) o afnio (punto di fusione 2230 °C ma alto potere emissivo e ossidi resistenti a temperatura elevata). Problematiche proprie del catodo sono il riscaldamento eccessivo, in parte eliminato dal circuito di raffreddamento e dalla rotazione continua del punto di attacco e l'erosione dovuta ai gas attivi, risolta mediante l'impiego di gas inerti o di inserti poco reattivi.

Nelle torce ad arco trasferito l'arco scocca tra il catodo nella torcia e il pezzo in lavorazione, che funge da anodo; nelle torce ad arco non trasferito invece l'ugello costringitore assolve anche la funzione di anodo (fig. 3).

Nel taglio dei metalli, data la maggiore densità d'energia trasferita al pezzo, si adotta la configurazione ad arco trasferito mentre la configurazione ad arco non trasferito rimane la scelta obbligata per la lavorazione dei materiali non metallici.

- **Costringitore d'arco**

L'estremità inferiore della torcia presenta un ugello sagomato opportunamente per collimare e costringere il fascio plasma all'interno di un condotto a diametro minore. L'ugello è realizzato in rame, un materiale ad alta conduttività termica che dissipa buona parte della potenza termica che lo investe, anche grazie all'ausilio di un circuito di raffreddamento. Nelle torce ad arco trasferito l'anodo si usura velocemente, soprattutto in

presenza del fenomeno del doppio arco (formazione di due archi in serie tra catodo e superficie in lavorazione), principale responsabile del danneggiamento dell'ugello e dell'instabilità dell'arco (fig. 4).

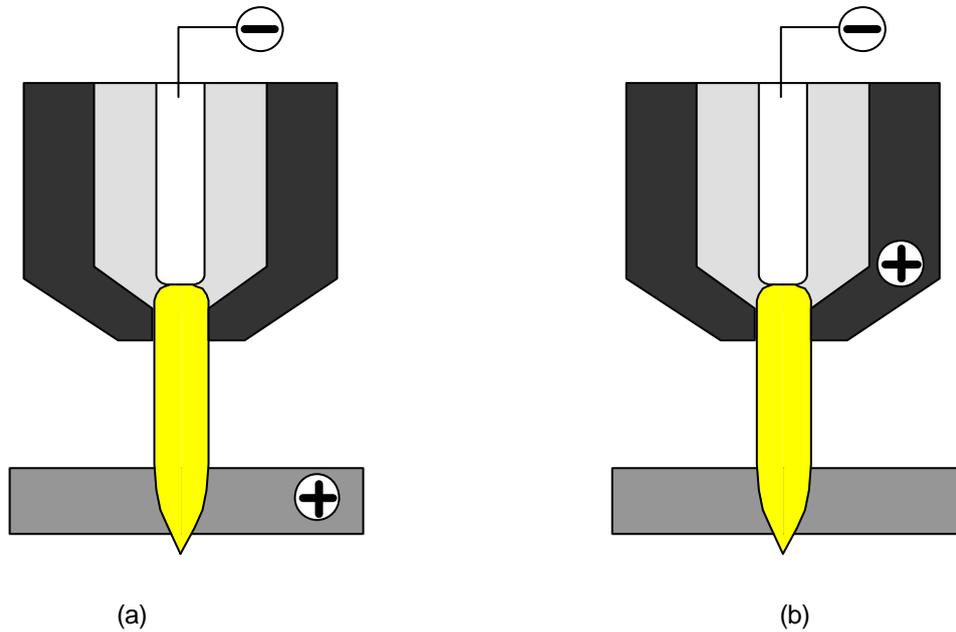


Fig. 3 – esempio di torcia a funzionamento ad arco trasferito (a) e ad arco non trasferito (b)

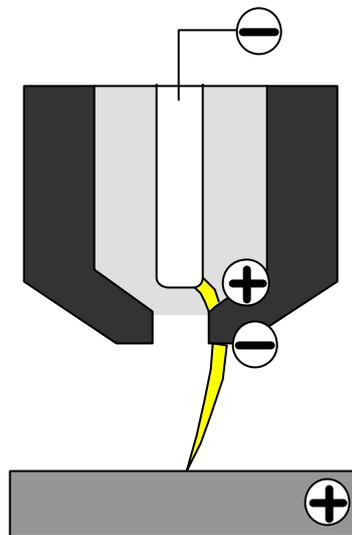


Fig. 4 – Doppio arco

- **Guide del percorso del gas**

Infine nella torcia sono ricavate le guide per il gas che viene opportunamente condotto, a partire dal catodo, verso la superficie di lavorazione in modo che il fascio risulti stabile e collimato, il livello di entalpia uniforme

e il riscaldamento efficiente. A questo scopo le torce più moderne prevedono l'utilizzo di dispositivi in grado di realizzare flussi del gas radiali e vorticosi rispetto all'asse dell'arco.

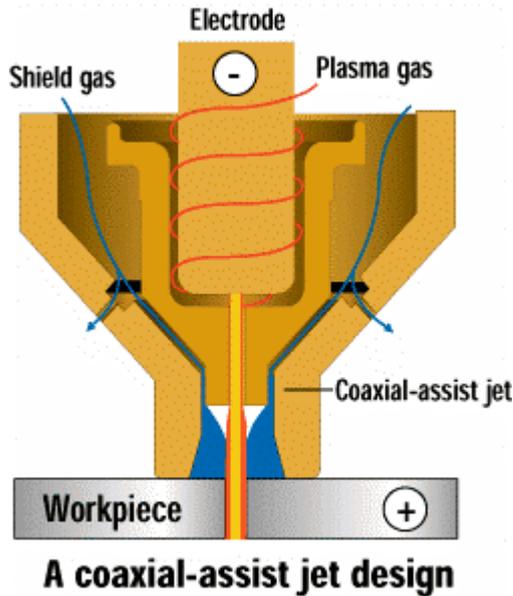


Fig. 4bis – Flusso di gas vorticoso e collimazione del fascio

Il fascio di gas ionizzato ad altissima temperatura, così realizzato, riscalda, fonde e vaporizza la superficie in lavorazione grazie al rilascio di energia degli elettroni che, a contatto con la superficie, si ricombinano a costituire la molecola, al riscaldamento per convezione del fascio termico e alla reazione esotermica dell'ossigeno (se il gas di processo è ossigeno o aria). Il getto di gas stesso poi provvede ad allontanare bave e sfridi di lavorazione dal solco di taglio. Il gas nella lavorazione plasma svolge sostanzialmente due compiti: da un lato è il vettore che trasporta l'energia trasferita agli elettroni (gas di lavoro), dall'altro isola il metallo fuso dall'atmosfera e raffredda la torcia e la superficie in lavorazione (gas protettivo o secondario). Potenziale di ionizzazione, conducibilità termica e reattività con il metallo fuso o con l'atmosfera sono le principali proprietà che determinano la scelta del gas di lavoro e protettivo più opportuno (tab. 2).

| TAB. 2 – PROPRIETA' GAS DI TAGLIO E DI PROTEZIONE [1] | | | | |
|---|------------------------------|--|---------------------------------|-----------------|
| Gas | Densità (kg/m ³) | Conducibilità termica (W/m ^{°K}) | Potenziale di ionizzazione (eV) | Peso molecolare |
| Argon | 1,656 | 0,0153 | 15,7 | 39,94 |
| Elio | 0,1656 | 0,1532 | 24,5 | 4,003 |
| Idrogeno | 0,0834 | 0,175 | 13,5 | 2,016 |
| Azoto | 1,1605 | 0,0258 | 14,5 | 28,013 |
| Ossigeno | 1,326 | 0,0258 | 13,2 | 31,99 |
| Aria | 1,2 | 0,0242 | - | 28,975 |

La superficie direttamente a contatto con la sorgente di energia, che non viene asportata dal getto di gas, risente dell'interazione con il fascio energetico: lo strato superficiale fonde e risolidifica molto rapidamente mentre gli strati sottostanti subiscono dei cicli di riscaldamento e raffreddamento altrettanto bruschi.

A ciò si aggiunge il fatto che l'utensile è un fascio a densità energetica variabile, pertanto la capacità di taglio diminuisce al diminuire dell'energia trasferibile dal getto al materiale. L'effetto più vistoso di questo fenomeno consiste nella conicità del solco di taglio (il fascio perde energia via via che penetra nel pezzo) e nell'irregolarità e asimmetria della parte inferiore del taglio (il fascio perde di coesione e stabilità).

Il taglio termico inoltre è la causa della formazione di bave sul bordo inferiore della lamiera. La formazione di bave durante il taglio plasma è il risultato della repentina risolidificazione del metallo fuso (e talvolta ossidato) sul bordo inferiore prima di venire allontanato dal getto plasma stesso. Un taglio plasma tradizionale si presenta con il bordo superiore arrotondato e con le pareti inclinate, a causa della diminuzione della capacità di taglio del fascio via via che penetra nel materiale.

Il bordo del taglio inoltre è solcato da striature dovute alla retroflessione del fascio e alla ridotta efficacia del meccanismo di taglio (fig. 5).

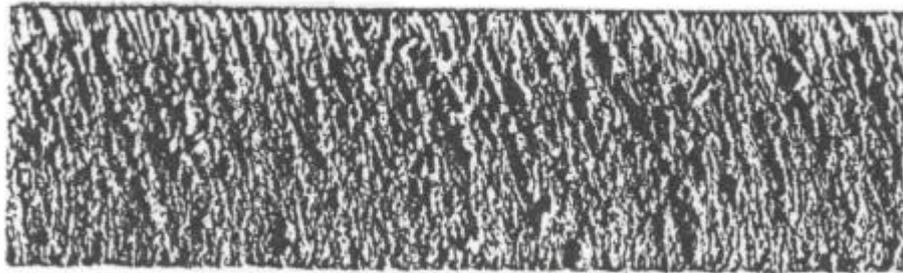


Fig. 5 – Superficie in Al lavorata al plasma tradizionale ad aria e metano (spessore 6,4 mm)

Il gas di lavoro o di protezione può contribuire a danneggiare la superficie lavorata: nel taglio di acciai al carbonio con azoto, ad esempio, si assiste alla formazione di nitruri sulla superficie e di bave sul bordo inferiore mentre si ottiene un bordo pulito, liscio e privo di bave con aria od ossigeno. Al contrario il taglio con aria di acciai inossidabili austenitici è soggetto a ossidazione mentre le superfici sono caratterizzate da solchi di ruvidità pronunciata e da presenza di bave sul bordo inferiore (fig. 6).

Un indice sintetico, che lega la qualità della lavorazione ai parametri di processo, è costituito dalla potenza specifica (kW/cm^2), determinata dal *trade off* tra qualità del taglio ed economicità dell'operazione, esprimibile in termini di vita utile dei componenti della torcia. Per aumentare la densità d'energia una possibilità consiste nell'aumentare l'intensità di corrente dell'arco a discapito della durata dei componenti della torcia, che si usurano con una velocità economicamente non sostenibile. Di contro aumentando la densità dell'energia migliora la qualità del taglio, in quanto si riduce la larghezza della zona di incidenza dell'arco, si produce un solco di taglio più stretto e meno inclinato e le bave vengono fuse e allontanate con facilità. Pertanto le *plasma arc machine* (PAM) hanno torce dimensionate e progettate per operare con livelli di intensità di corrente, che sono un compromesso ottimale tra usura e qualità.

Nei sistemi tradizionali la densità energetica specifica del fascio varia tra $1800\text{-}3100 \text{ A}/\text{cm}^2$ in modo non uniforme, funzione, principalmente dell'usura dell'ugello. Usura dei componenti, scostamenti dalla concentricità e grandi enti di pressioni sono i principali responsabili delle difettosità dei sistemi tradizionali, che

si riflettono sulla qualità della lavorazione e producono solchi di taglio inclinati, deflessione del fascio e doppi archi.

Una seconda alternativa per incrementare la densità energetica consiste nella diminuzione del diametro del fascio, accorgimento che differenzia il taglio plasma convenzionale dal taglio plasma ad alta definizione.

PLASMA AD ALTA DEFINIZIONE

Nell'ultimo decennio, al fine di migliorare le prestazioni del taglio plasma, sono state effettuate numerose ricerche orientate a un controllo più accurato dell'energia del fascio, per ottenere quella costanza e precisione dei risultati che mancano ai sistemi tradizionali. Una serie di innovazioni sono state apportate sui componenti principali di una cella di taglio plasma, che hanno condotto alla realizzazione di un nuovo sistema. Si è assistito così all'ampliamento del campo delle applicazioni PAM fino alla parziale sovrapposizione con quello del taglio dei metalli mediante laser. Numerosi appellativi sono stati introdotti per identificare questo nuovo processo.

Inizialmente si sono diffuse alcune definizioni, tra le quali *super-constricted plasma arc*, *microplasma*, *precision plasma*, *fine plasma*. In seguito tuttavia si è affermata ed è divenuta d'accezione comune (specialmente nel mondo anglosassone) la denominazione *high-tolerance plasma arc cutting* (HTPAC), che tradurremo liberamente con *plasma ad alta definizione* [2].

| Processo | Caratteristiche | Densità energetica |
|----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Plasma convenzionale | 40-200 A | 700 kW/cm ² |
| Plasma ad alta definizione | 15-100 A | 1256 kW/cm ² |
| Laser Nd-Yag | 1,5 kW | 512 kW/cm ² |
| Laser CO ₂ | 3 kW | 1500 kW/cm ² |

In generale a ogni appellativo corrisponde un particolare design della torcia, coperto da brevetto. Storicamente il primo brevetto HTPAC appartiene a due aziende giapponesi. Nel 1989 infatti Komatsu e Koike Aronson hanno brevettato e dato il via alla produzione delle prime torce HTPAC. Komatsu si riferisce al proprio brevetto con il nome commerciale di *Razor Cutting*, mentre Koike Aronson ha coniato il termine *Super-cut*. Nel 1990 Hypertherm, il principale produttore americano di sistemi taglio plasma, e L-Tec, si sono uniti in una partnership, che ha avuto come risultato il brevetto di un nuovo sistema plasma ad alta definizione,

denominato HyDefinition®. Entrambe le torce raggiungono valori di densità d'energia ben maggiori (tab. 3), mediante la diminuzione dell'area dell'orifizio dell'ugello e l'incremento della concentricità e collimazione del fascio plasma attraverso l'adozione di alcuni dispositivi, in parte diversi a seconda che si tratti del brevetto Hypertherm o Komatsu. Tuttavia, poiché il primo è più noto e divulgato, ne illustreremo i principali componenti, riservandoci poi al termine un cenno anche al meno noto brevetto giapponese [3] [4] [5] [6].

HyDefinitionâ plasma

Il plasma ad alta definizione deve la sua nascita agli innegabili vantaggi dei sistemi di taglio plasma ad aria e ossigeno rispetto al sistema ad azoto riassumibili in:

- alta velocità di taglio;
- ottima qualità delle superfici di taglio, in particolare profilo rettilineo;
- assenza di bave;
- superficie di taglio pulita.

A fronte di questi vantaggi vi sono degli svantaggi che hanno fortemente ostacolato lo sviluppo di sistemi a ossigeno, il principale dei quali è rappresentato dalla limitata vita utile delle parti usurabili. Un sistema a taglio plasma convenzionale (ad azoto) sopporta fino a 600 accensioni, prima che l'usura dei componenti della torcia incida sensibilmente sulla qualità del taglio. Una PAM a ossigeno, che tagli lo stesso materiale alla stessa velocità, regge fino a un massimo di 150 accensioni.

Inoltre, una PAM convenzionale sia a ossigeno sia ad azoto presenta alcuni inconvenienti che pregiudicano la qualità della lavorazione, già illustrati in precedenza.

La torcia plasma ad alta definizione nasce quindi come tentativo di migliorare gli svantaggi del sistema tradizionale e di enfatizzare i benefici del taglio a ossigeno.

Analizziamo i singoli interventi migliorativi introdotti dal brevetto Hypertherm.

Incremento della densità di energia

È riconosciuto che, per aumentare la qualità del taglio, occorre passare da valori di densità d'energia caratteristici dei sistemi convenzionali (1800-3100A/cm²) a valori ben maggiori (6200-9300A/cm²).

Nei sistemi tradizionali inevitabilmente una riduzione del diametro dell'ugello implica una diminuzione della portata di gas, se si vuole evitare la formazione di surplus di gas nella parte antistante l'ugello con conseguente instabilità del fascio in uscita.

Per realizzare contemporaneamente un flusso di gas stabile e omogeneo (e quindi un'alta portata) e un diametro di fascio ridotto, Hypertherm ha brevettato la tecnologia *High Flow Vortex Nozzle*®. Un vortice di gas molto sostenuto e denso viene generato attorno alla superficie dell'elettrodo, mediante un anello che mette in rotazione il flusso di gas. Tuttavia la portata di gas generata si rivela poi eccessiva per le strette dimensioni dell'orifizio dell'ugello. Per contrastare sia l'instabilità e la turbolenza sia un gradiente di temperatura radiale eccessivo, la portata del gas, che sostiene il moto vorticoso, in parte deve essere allontanata prima della fuoriuscita dall'ugello.

Questa funzione è svolta dall'*High Flow Vortex Nozzle*® che, nella camera di mescolamento ad alta velocità antistante l'ugello primario, separa e allontana lo strato di gas relativamente freddo che si raccoglie sulla periferia del vortice stesso. In questo modo si ottengono contemporaneamente un fascio molto denso e stabile e un diametro ridotto.

Abbattimento doppio arco

Per risolvere il problema del doppio arco Hypertherm ha brevettato un dispositivo, denominato *Shield Technology*®, costituito da un sottile cappuccio di protezione in rame flottante, che avvolge l'ugello. Con

questo accorgimento virtualmente si abbatte il 'fenomeno del doppio arco, guadagnando in durata dell'ugello, capacità di sfondamento (la torcia può essere portata molto vicino al pezzo) e qualità del taglio.

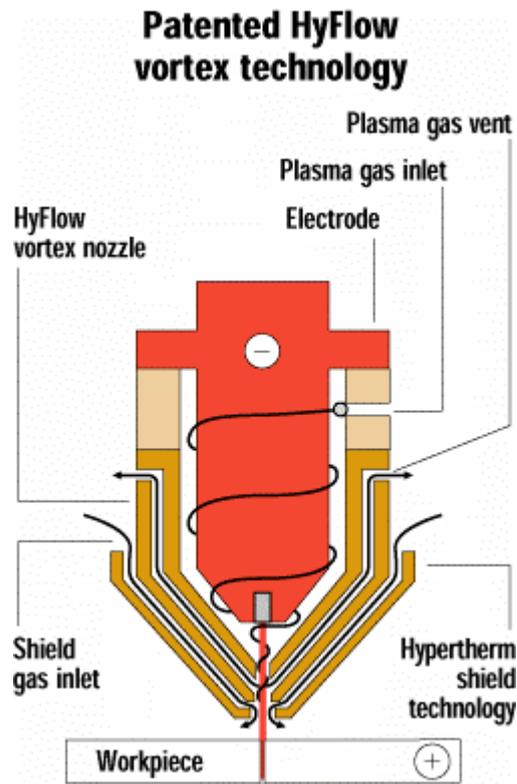


Fig. 6bis - High Flow Vortex Nozzle®

Durata dei componenti usurabili

Negli elettrodi per il taglio convenzionale a ossigeno il materiale emittente è montato all'interno di un cilindro di rame raffreddato ad acqua.

Durante il processo di taglio l'estremità dell'elettrodo in afnio fonde. Al termine di ogni ciclo di taglio una parte dell'afnio fuso viene estromesso dalla superficie dell'elettrodo. In parte si deposita sulle pareti dell'ugello, in parte fuoriesce attraverso l'orifizio. Questa perdita di materiale crea una piccola cavità nella parte terminale dell'elettrodo, che va usurandosi un'accensione dopo l'altra. L'elettrodo diviene inutilizzabile quando, a forza di consumarsi, la depressione penetra così profondamente nell'afnio che l'arco si innesca tra il rame circostante e il pezzo, causando la rapida fusione e distruzione dell'elettrodo stesso.

Anche l'ugello stesso viene danneggiato dalla deposizione di materiale fuso proveniente dall'elettrodo, che provoca deviazioni e distorsioni nel percorso del fascio plasma.

Il brevetto L- Tec prevede che l'accensione dell'arco non avvenga in ossigeno, come nei sistemi tradizionali, ma in una miscela di gas inerte. L'accensione in ossigeno infatti tende a rompere e allontanare lo strato di ossido protettivo, che avvolge l'afnio. L'ossido deve riformarsi alla successiva accensione. Questo processo di allontanamento e ricostituzione dello strato d'ossido protettivo è all'origine dell'usura dell'elettrodo.

L'accensione in gas inerte non ossidante (azoto) invece tende a preservare lo strato ossidato formatosi dalla lavorazione precedente e quindi incrementa la durata dell'elettrodo.

Anche lo spegnimento dell'arco in un gas inerte, che quindi raffredda l'elettrodo in una atmosfera non ossidante, concorre a mantenere lo strato protettivo.

Mentre L- Tec ha concentrato i suoi sforzi sulla riprogettazione dell'elettrodo della torcia convenzionale, contemporaneamente Hypertherm si è occupata del controllo del processo di taglio, mettendo a punto la tecnologia brevettata con il nome di *Long Lite Oxygen Consumable Technology*®.

Per controllare maggiormente le differenti fasi del processo (accensione, taglio, spegnimento) Hypertherm ha sviluppato un microprocessore, che modula e coordina a seconda delle diverse fasi l'intensità di corrente e la portata del gas nella torcia.

Durante la fase di accensione, infatti, intensità di corrente e portata del gas sono mantenute basse, così da non danneggiare termicamente l'inserto in afnio e conservarne lo strato di ossido. Successivamente durante il taglio entrambe le quantità crescono.

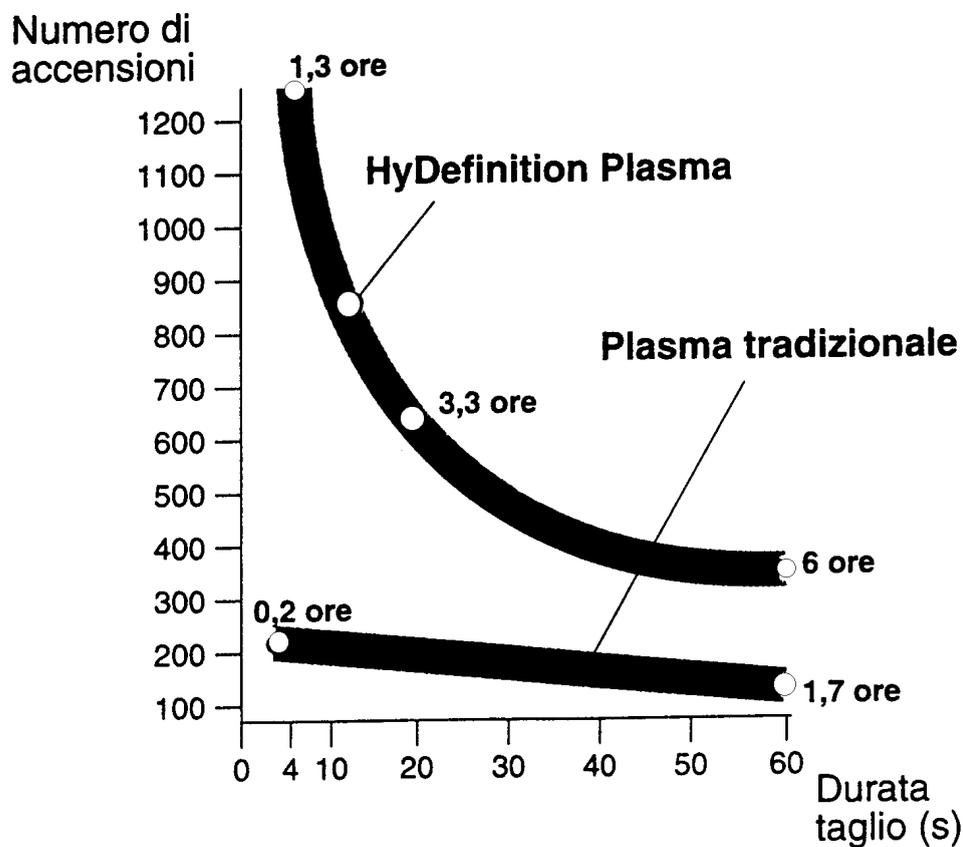


Fig. 7 – Confronto della vita utile dei componenti della torcia al plasma tradizionale confrontata con la tecnologia LongLife [4]

Anche lo spegnimento avviene secondo un preciso ordine: portata del gas e intensità di corrente vengono diminuite progressivamente, per consentire all'afnio fuso di risolidificarsi.

Durante l'operazione di taglio, infatti, difficilmente avviene l'eiezione del metallo fuso, che è ostacolata dal gradiente di pressione, instauratosi in seguito al moto vorticoso del gas, Un brusco spegnimento tuttavia ne provocherebbe l'immediata fuoriuscita.

Con i dispositivi illustrati, che minimizzano gli shock termici e chimici di inizio e fine taglio, la durata delle parti usurabili si allunga fino a 600-1200 accensioni, senza ledere la qualità del taglio.

In un sistema plasma convenzionale, infatti, il degrado della qualità di taglio cresce linearmente con l'usura dei componenti della torcia, fino al punto che diviene inaccettabile. Spesso è necessario variare i parametri di taglio per compensare l'usura.

I test eseguiti su un sistema plasma Hydefinition hanno messo in evidenza come l'usura non cresca linearmente con il degrado della qualità di taglio. Infatti, la qualità rimane relativamente costante durante tutta la vita media degli usurabili. Inoltre, elettrodo e ugello si usurano approssimativamente nello stesso tempo, consentendo una migliore gestione degli interventi di manutenzione. I test di laboratorio mostrano che la vita degli elettrodi cresce di quattro, sei volte quando un sistema di taglio convenzionale a ossigeno utilizza la tecnologia *LongLife* (fig. 7).

Razor Cutting Plasma

Anche il brevetto Razor Cutting della Komatsu si ripropone come obiettivo principale di accrescere la densità d'energia dell'arco plasma attraverso l'incremento della stabilità e della collimazione del fascio plasma. La differenza principale tuttavia tra la torcia di matrice giapponese e quella americana si colloca nel dispositivo di stabilizzazione del flusso di gas: sostanzialmente l'High Flow Vortex Nozzle® per la torcia Hypertherm e l'elettromagnete per la torcia Komatsu. L'elemento di originalità della torcia ad alta definizione giapponese, infatti, è rappresentato dalla presenza attorno all'elettrodo di un magnete che genera un campo magnetico con due effetti positivi sul fascio plasma. La forza di Lorentz agente sull'arco plasma mette in rotazione velocemente il flusso di gas ionizzato nella zona d'estremità dell'elettrodo. Ciò mantiene in costante movimento il punto di innesco dell'arco distribuendo l'usura su tutta la superficie dell'elettrodo e migliorando la durata dell'elettrodo stesso.

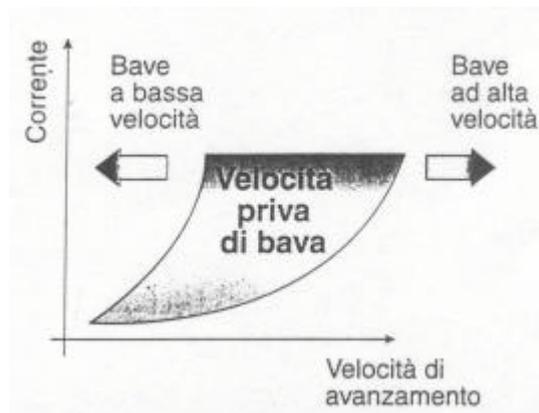


Fig. 9 – Effetto della velocità di taglio sulla formazione di bave

Le linee di forza del campo magnetico, inoltre, intrappolano il plasma in rotazione e lo compattano, riducendo il rischio di deviazioni o di formazione di archi secondari quando lascia l'ugello.

In questo modo si mantiene la stabilità dell'arco anche a livelli di velocità di taglio elevate. Mediante la contemporanea riduzione del diametro dell'ugello si realizza un fascio di minore diametro oltre che di stabilità superiore.

BENEFICI DEL TAGLIO PLASMA AD ALTA DEFINIZIONE

Date le potenze specifiche in gioco tutti i metalli possono essere lavorati con plasma ad alta definizione anche quelli molto duri o difficili da tagliare con tecnologie tradizionali, quali l'acciaio inossidabile, il titanio e leghe di alluminio purché nei limiti degli spessori suggeriti (fig. 8).

Oltre i 15-20 mm di spessore infatti si assiste a un eccessivo degrado della qualità di taglio e a una drastica riduzione della vita utile dei componenti della torcia (tab. 4).

| TAB. 4 – MATERIALI TAGLIABILI HDP [4] | |
|---------------------------------------|---------------|
| Metalli | Spessori (mm) |
| Acciai inox | 0,4 – 15 |
| Leghe di Al | 1 – 15 |
| Acciai al C | 0,5 – 12 |
| Leghe di Cu | 0,4 – 10 |

All'interno di questo limite i parametri di processo (essenzialmente intensità di corrente e velocità di avanzamento) possono essere opportunamente modulati per ottenere un taglio economico di buona qualità (tab.5).

Nel taglio plasma, HDP, infatti per una data corrente vi è un range di velocità all'interno del quale la qualità si presenta accettabile. Al di fuori di questo intervallo la qualità degrada. In particolare a velocità molto basse la qualità del taglio peggiora notevolmente: la conicità si fa pronunciata, la zona termicamente alterata (ZTA) estesa e si ha produzione di bave [7].

| TAB. 5 – PARAMETRI DI PROCESSO [6] | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|
| Spessore (mm) | Diametro ugello (mm) | Corrente d'arco (mm) | Velocità di lavoro (mm) | Profondità di taglio (mm) |
| Acciai a basso contenuto di C | | | | |
| 1,00 | 1,00 | 30 | 4,05 | 1,05 |
| 2,00 | 1,00 | 45 | 4,06 | 2,00 |
| 5,00 | 2,00 | 150 | 3,07 | 3,00 |
| 10,00 | 1,06 | 180 | 2,00 | 3,00 |
| 14,00 | 2,00 | 190 | 1,07 | 3,05 |
| 16,00 | 2,00 | 120 | 1,05 | 3,05 |
| 20,00 | 2,05 | 260 | 1,05 | 5,00 |
| Alluminio | | | | |
| 1,05 | 0,06 | 40 | 3,00 | 1,05 |
| 4,00 | 1,05 | 85 | 1,07 | 3,00 |
| 5,00 | 2,00 | 120 | 3,00 | 3,05 |
| 7,00 | 1,05 | 190 | 2,00 | 4,00 |

Il fenomeno delle formazione di bave può avvenire sia quando la velocità è eccessivamente elevata (*high-speed dross*) sia quando è eccessivamente bassa (*low speed dross*). Generalmente le bave prodotte a bassa velocità non aderiscono tenacemente al bordo di taglio e possono essere asportate con facilità, mentre quelle generate ad alta velocità sono più difficili da rimuovere.

Pertanto il taglio HDP è caratterizzato da una finestra di velocità di avanzamento, al di fuori della quale il risultato del taglio non è accettabile (fig. 9).

All'interno di questo intervallo di velocità anche nel caso HDP i migliori risultati qualitativi si ottengono a bassa velocità e a bassa intensità di corrente. Le basse velocità infatti consentono alla torcia di seguire con maggiore precisione il percorso di taglio mentre la densità di energia trasferita al pezzo è minore, cosicché il solco di taglio non risulta eccessivamente largo e la zona termicamente alterata ampia.

Le velocità di taglio raggiunte sono in ogni caso elevate, paragonabili a quella di altri processi in primis il laser (tab. 6).

Il taglio HDP può essere analizzato ricorrendo ad alcuni indici di qualità, distinti in geometria del bordo di taglio, caratteristiche superficiali e danneggiamento del bordo di taglio.

| TAB. 6 – CONFRONTO TRA LE VELOCITA' DI TAGLIO PER ACCIAI AL CARBONIO [3] | | | | |
|---|------------------------------|-----------------------------------|---------------|----------------|
| Acciai al carbonio | | Velocità di lavoro (m/min) | | |
| | | 3,4 mm | 6,4 mm | 12,7 mm |
| Plasma alta definizione | HyDefinition 50 A | 1,4 | 0,9 | |
| | HyDefinition 100 A | 3,8 | 3,4 | 2,2 |
| | Komatsu 90 A | | 2,4 | 1,0 |
| Plasma convenzionale | HT2000 A O ₂ | 6,1 | 3,0 | 1,5 |
| | MAX100 100 A Air | 4,6 | 2,2 | 0,9 |
| Laser di potenza | Nd: Yag Laser 1000 W | 3,3 | 1,5 | |
| | CO ₂ Laser 1800 W | 3,2 | 1,6 | 0,8 |
| | CO ₂ Laser 2600 W | 3,8 | 1,6 | 1,0 |

La risposta qualitativa al processo dipende principalmente dalla diversa struttura del getto, dal tempo di stazionamento del getto sul pezzo e dalle caratteristiche meccaniche del materiale, oltre che dai parametri tecnologici di processo.

Geometria del bordo di taglio

L'alta densità dell'arco produce un solco di taglio da 1/2 a 1/3 più stretto del solco ottenuto con plasma convenzionale (tab. 7).

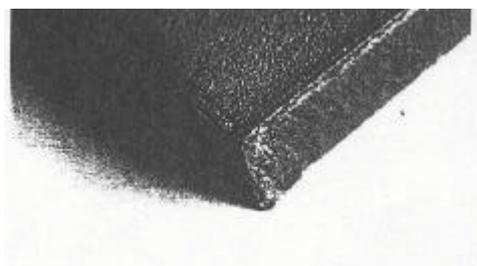


Fig. 10 – Particolare dello spigolo di un campione inox (spessore 6,4 mm) lavorato con HDP ad aria)

La "rigidità" della colonna d'arco, inoltre, è la principale responsabile della vistosa diminuzione dell'inclinazione delle pareti (tab. 8).

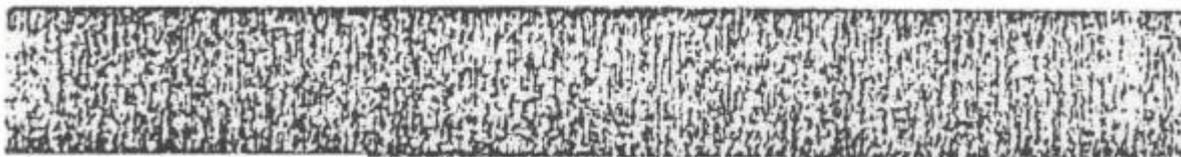


Fig. 11 – Bordo in Al lavorato HDP a aria e metano (spessore 3,2 mm)

Le bave, se la lavorazione viene eseguita all'interno dell'intervallo privo di bave (fig. 9), sono molto ridotte e in alcuni casi praticamente assenti. Un indice per valutare accuratezza e precisione del taglio HDP può essere costituito da una brusca variazione nella direzione di taglio. Nel cambiamento di direzione infatti il fascio subisce fenomeni di ritardo e instabilità, che si ripercuotono sul bordo tagliato. Lo spigolo del contorno esterno è un punto critico della lavorazione in quanto presenta una repentina variazione della direzione di avanzamento della torcia. Anche gli spigoli eseguiti con il plasma ad alta definizione hanno una buona precisione e accuratezza, sebbene risultino un poco più arrotondati e soprattutto risentano della conicità del fascio (fig. 10).

| TAB. 7 – AMPIEZZA SOLCO DI TAGLIO [3] | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | Intensità di corrente (A) | | | | |
| | 15 | 30 | 50 | 70 | 100 |
| Ampiezza kerf (mm) | 0,9 | 1,3 | 1,6 | 1,9 | 2,3 |

Caratteristiche della superficie

La superficie lavorata al plasma può essere descritta mediante due caratteristiche, una microgeometrica, valutabile con gli indici di rugosità, e una macrogeometrica relativa alle striature e ondulazioni lasciate dal fascio che scorre lungo il bordo di taglio.

| TAB. 8 – INCLINAZIONE SOLCO DI TAGLIO [3] | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Materiale | Spessore (mm) | | | | | | | | | | | | |
| | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 1,3 | 1,5 | 1,9 | 2,7 | 3,3 | 4,8 | 6,4 | 9,5 | 12,7 |
| Acciaio al C, Plasma O ₂ | | | | 0-2° | 0-2° | 0-2° | 0-2° | 0-2° | 0-2° | 0-2° | 0-2° | 1-3° | 1-3° |
| Acciaio inox, Plasma Aria | 0-4° | 0-4° | 0-4° | 0-4° | 0-4° | 0-4° | 0-3° | 0-3° | 0-3° | 0-3° | 1-3° | 1-3° | |
| Alluminio, Plasma Aria | | | | | 0-4° | 0-4° | 0-3° | 0-3° | 0-3° | 0-3° | 0-3° | 0-3° | |

Si osservi ad esempio nella fig. 11 un bordo in alluminio dallo spessore di 3,2 mm tagliato HDP ad aria e metano. La superficie presenta una parte superiore con un aspetto levigato mentre il tratto inferiore è rugoso

e coperto di proiezioni di materiale risolidificato. Il bordo superiore è arrotondato. Entrambi i tratti, inoltre, sono ricoperti da striature anche se molto leggere.

Un taglio eseguito su acciaio inox è caratterizzato invece da un bordo superiore netto e da una parte superiore più segnata dal materiale risolidificato rispetto alla superficie sottostante. Inoltre sono maggiormente pronunciate le striature lasciate dal fascio di gas (fig. 12).

La misura delle irregolarità superficiali, attraverso i parametri R_a , ed R_t ed R_z , conferma il diverso andamento delle quantità misurate sulla parte superiore del taglio e su quella inferiore per entrambi i campioni (tab. 9).

Danneggiamento

Nel taglio plasma il danneggiamento più vistoso è costituito dalla zona termicamente alterata, messa in evidenza nel provino in acciaio al carbonio della figura 13.

La ZTA si presenta sia sotto forma di uno strato fuso e risolidificato, di struttura metallurgica diversa dal materiale base o di uno strato che, pur non avendo subito la fusione, registra un cambiamento di fase allo stato solido. A questo proposito si osservi l'ingrandimento di un campione di alluminio (6,3 mm di spessore tagliato HDP ad aria e metano) che presenta sulla superficie porosità diffusa e uno strato d'ossido mentre nella parte interna mostra sia lo strato fuso e risolidificato sia la trasformazione di fase allo stato solido (fig. 14).

| TAB. 9 – INDICI DI FINITURA SUPERFICIALE | | | | |
|---|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Alluminio | | Inox | |
| | Superiore | Inferiore | Superiore | Inferiore |
| R_a (μm) | 3,97 | 12,4 | 6,98 | 3,05 |
| R_t (μm) | 39,3 | 12,9 | 49,6 | 30,2 |
| R_z (μm) | 24,3 | 84,5 | 37,1 | 20,1 |

Inoltre, a seconda del tipo di materiale considerato, si possono osservare marcate alterazioni microstrutturali, che possono consistere nella formazione di strati di martensite superficiale in alcuni acciai, nella solubilizzazione di eventuali fasi secondarie o precipitati in diverse leghe non ferrose e acciai inossidabili, in fenomeni di fragilimento da idrogeno e iper invecchiamento nelle leghe di alluminio.

| TAB. 10 – ZTA IN CAMPIONI DI ACCIAIO AL C [3] | | | | | | | | |
|--|----------------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|
| PAM | 100A, 6,4 mm | | | | 100A, 12,7 mm | | | |
| | Energia in ingresso (J/mm) | Velocità avanz. (mm/s) | Profondità ZTA (mm) | Area ZTA (mm^2) | Energia in ingresso (J/mm) | Velocità avanz. (mm/s) | Profondità ZTA (mm) | Area ZTA (mm^2) |
| Tradizionale Aria | 246 | 52,9 | 0,25 | 1,61 | 944 | 14,8 | 0,63 | 7,94 |
| Alta definizione O_2 | 246 | 50,8 | 0,41 | 2,57 | 513 | 25,3 | 0,60 | 7,57 |
| Alta definizione O_2 | 247 | 57,2 | 0,24 | 1,52 | 544 | 27,0 | 0,37 | 4,64 |

L'estensione della ZTA è correlata con le variabili di processo, quali la velocità di taglio, la potenza e lo spessore.

Poiché il processo HDP comporta alte densità d'energia e tempi di esposizione del fascio minori, la diminuzione del tempo necessario per eseguire il taglio produce una ZTA meno ampia (tab. 10).

NORMATIVA

Infine, può essere interessante valutare come la normativa tecnica abbia già recepito le novità del processo di taglio plasma.

Nel caso del taglio plasma la normativa tecnica europea si è occupata diffusamente della descrizione della geometria del solco di taglio, della determinazione delle tolleranze e della rugosità naturali del processo e della classificazione dei difetti più comuni [10] [11]. Tuttavia l'attuale normativa sia europea che internazionale [12] [13] è ferma al taglio plasma tradizionale e non è aggiornata sul taglio ad alta definizione, che presenta geometria, tolleranze di processo e difettosità in parte diversi dal processo tradizionale.

UNO SGUARDO AL FUTURO

Come si è avuto modo di verificare il taglio plasma ad alta definizione, pur essendo diffuso e applicato soprattutto nel taglio contornato a due assi controllati, è una tecnologia ancora relativamente giovane e promettente. I principali sviluppi futuri che è possibile prospettare nel settore HDP riguarderanno essenzialmente:

- applicazioni di taglio 3D con movimentazione cartesiana o robotizzata;
- controllo di processo (controllo della stand off distance, automazione, strumentazione e monitoraggio);
- gamma dei materiali lavorabili;
- spessori massimi;
- vita utile delle parti usurabili;

sviluppi tesi ad assicurare e confermare la peculiarità della lavorazione ad alta definizione, ovvero la qualità del taglio (bordi squadriati, superfici prive di bave, ZTA limitata) e la produttività (velocità di taglio elevate e bassi costi di investimento, di esercizio e di manutenzione).

Bibliografia

- [1] A. Kobayashi, *New applied technology of plasma heat sources*, Welding International, 1990, Vol.4
- [2] B. Irving, *High-Tolerance plasma arc cutting carves out some niches in industry*, Welding Journal, October 1992.
- [3] M. Ballard, *High Definition Plasma Arc Cutting*, VI Giornata Nazionale Waterjet, Modena, 1998.
- [4] J. Colt, *LongLife oxygen plasma cutting*, Hypertherm.
- [5] L. Ferrington, *New oxygen plasma process rivals laser cutting methods*, Welding Journal, June 1994.
- [6] Yu Bogorodskii, *Precision plasma arc cutting*, *Welding in the World*, 1991, Vol. 29.
- [7] M. Manohar, J.P. Snyder II, *Dross formation during plasma arc cutting of steels*, Welding Journal, November 1994.
- [8] Y.Wu, C. Hackett: S. Eickoff, *The effects of plasma arc cutting on mild steel*, Hypertherm.
- [9] Y. Wu, C. Hackett, S. Eickoff, *Thermal and chemical effects of plasma-arc cutting of stainless steel and aluminium*, Hypertherm.

- [10] *Thermal cutting; plasma arc cutting of process, terms, quality, dimensional tolerances*, DIN 2310- Teil4, 1987.
- [11] *Faults of flame and plasma cuts; classification, terms, definitions*, DIN 8518, 1974.
- [12] *Criteria for describing oxygen-cut surfaces*, AWS C4.1-77, American Welding Society.
- [13] *Quality Standard for gas cut surfaces*, WES 2801-1980, Japan Welding Engineering Society, 1980.