



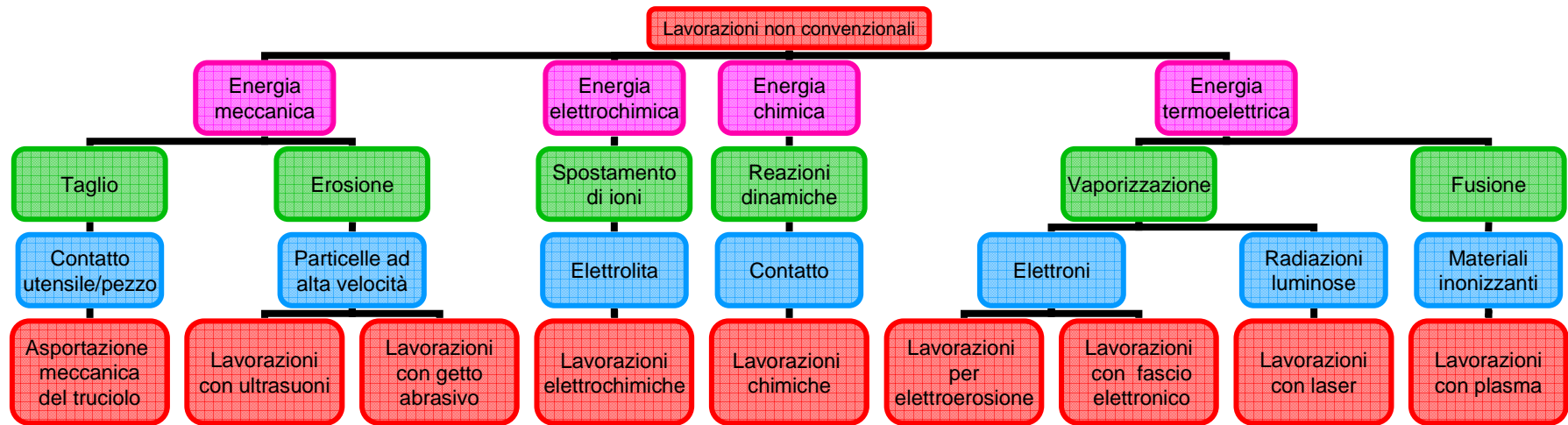
Applicazioni Industriali

Tecnologie non convenzionali

Marco Raimondi

e-mail: mramondi@liuc.it

Classificazione



Dati di lavorazione comparativi

Tab. 7.11 - Dati di lavorazione comparativi

Tipo di lavorazione	Velocità di asportazione (mm ³ /min)	Tolleranze realizzabili (μm)	Finitura superficiale, R _a (μm)	Potenza (W)
Lavorazioni convenzionali	50.000	50	0,5 + 5,0	3.000
Lavorazioni con ultrasuoni	300	7,5	0,2 + 0,5	1.000
Lavorazioni con getto abrasivo	0,8	50	0,5 + 1,2	250
Lavorazioni elettrochimiche	20.000	50	0,1 + 2,5	100.000
Lavorazioni chimiche	15	50	1,0 + 2,5	-
Lavorazioni per elettroerosione	800	15	0,2 + 1,2	10 kVA
Lavorazioni con fascio elettronico	1,6	25	0,5 + 2,5	150 + 2.000
Lavorazioni al laser	0,1	25	0,5 + 1,2	15.000 (max)
Lavorazioni al plasma	75.000	125	scadente	50.000

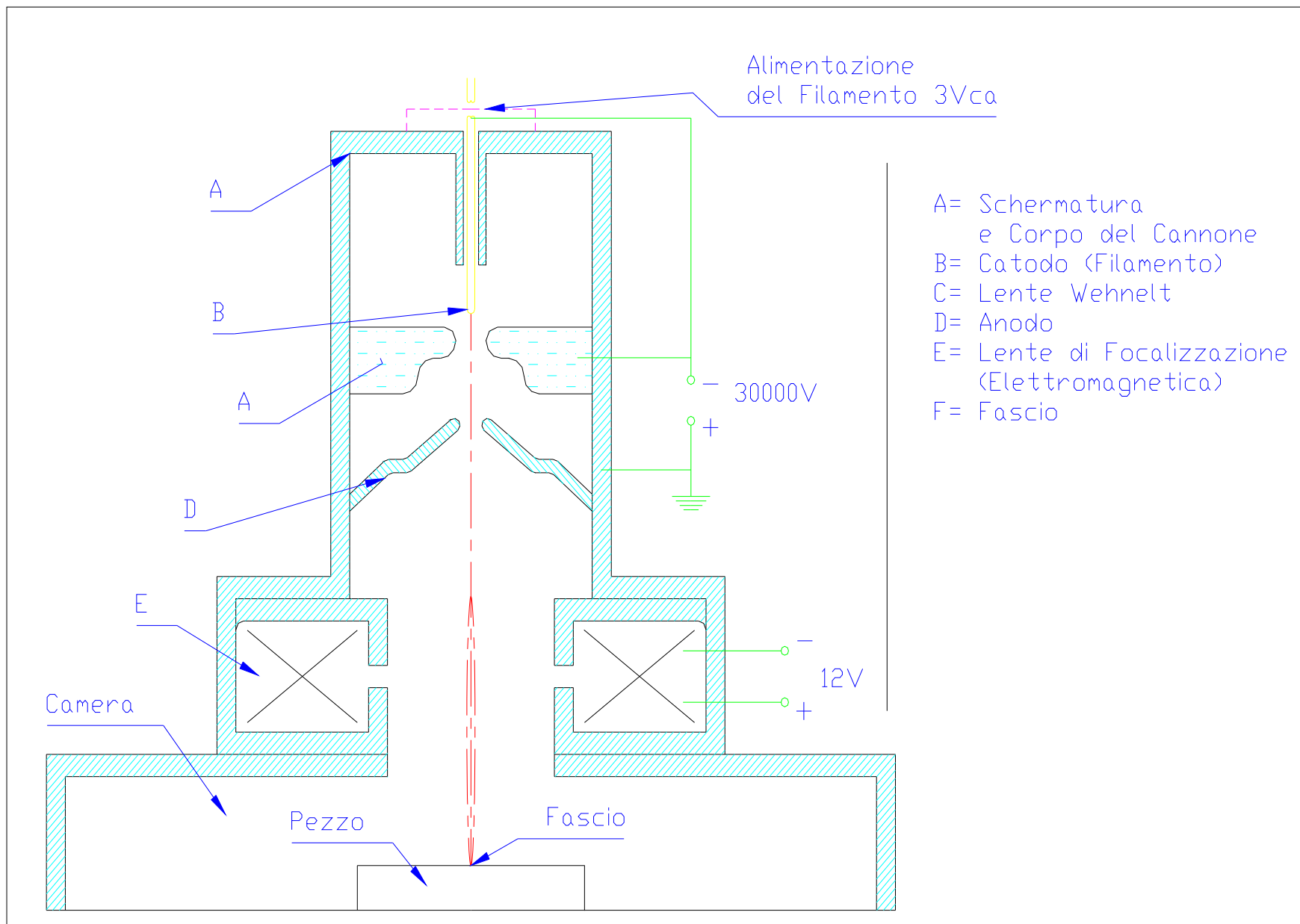
Fascio elettronico

EBM - Electronic Beam Machining

EBM – Electronic Beam Machining

- **Il principio di funzionamento consiste nella generazione di un flusso di ioni (IBM) o di elettroni (EBM) che viene accelerato e sparato contro la superficie del pezzo in lavorazione che si scalda, fonde ed evapora**
- **Le operazioni eseguibili sono:**
 - **Taglio**
 - **Foratura**
 - **Saldatura**
 - **Impianto di atomi sulla superficie del pezzo (drogaggio) o semplice deposizione (ricopertura)**
- **Tali operazioni devono essere realizzate sotto vuoto e ciò limita la dimensione del pezzo in lavorazione**

- **L'EBM è un procedimento termoelettrico; la notevole somiglianza alla lavorazione tramite *raggio laser*, è data dalle elevatissime temperature e densità di energia termica raggiungibili: il calore è generato da elettroni lanciati ad alta velocità, che, colpendo il pezzo, trasformano la loro energia cinetica in energia termica.**
- **Nel cannone elettronico, oltre all'anodo e il catodo, è presente un terzo elettrodo, detto Lente Wehnelt, che è collegato al catodo e che ha la funzione di regolare il flusso di elettroni.**
- **La tensione fra anodo e catodo, detta tensione acceleratrice, influisce sulla velocità degli elettroni e sull'energia termica sviluppabile tramite il bombardamento elettronico, è quindi proporzionale alla tensione; generalmente non si superano i 60 Kw di potenza.**
- **Il cannone è sistemato in una camera a vuoto ed è attrezzato per potersi spostare in senso verticale; il fascio rimane generalmente fermo e il pezzo da lavorare viene mosso alla velocità desiderata sotto il fascio elettronico (moto di alimentazione); le temperature ottenibili sono sufficienti a vaporizzare il Tungsteno (la cui temperatura di fusione è 3370°C) o qualsiasi altro materiale conosciuto.**



- **Gli elettroni sono emessi dal catodo per effetto Joule e si dirigono verso l'anodo accelerati a causa della differenza di potenziale**
- **Superato l'anodo il fascio è focalizzato sul pezzo dalle due bobine magnetiche che impediscono la sua dispersione grazie alla forza di Lorentz**
- **Ciò che importa non è la potenza assoluta bensì la potenza specifica intesa come potenza del fascio di elettroni sulla superficie di impatto**
- **L'area di lavoro alterata è molto ridotta**
- **Occorre lavorare nel vuoto perché gli elettroni sarebbero comunque frenati da un qualunque gas. Ciò evita qualunque problema di ossidazione**
- **Le potenze specifiche in gioco sono quelle di un laser ad elevata potenza, molto maggiori rispetto alle saldature tradizionali**
- **L'elettrone che impatta sull'atomo lo eccita ed al momento del decadimento vengono emessi raggi X: questa la ragione per la quale tale operazione deve essere schermata**

Schema di EBM Electronic Beam Machining

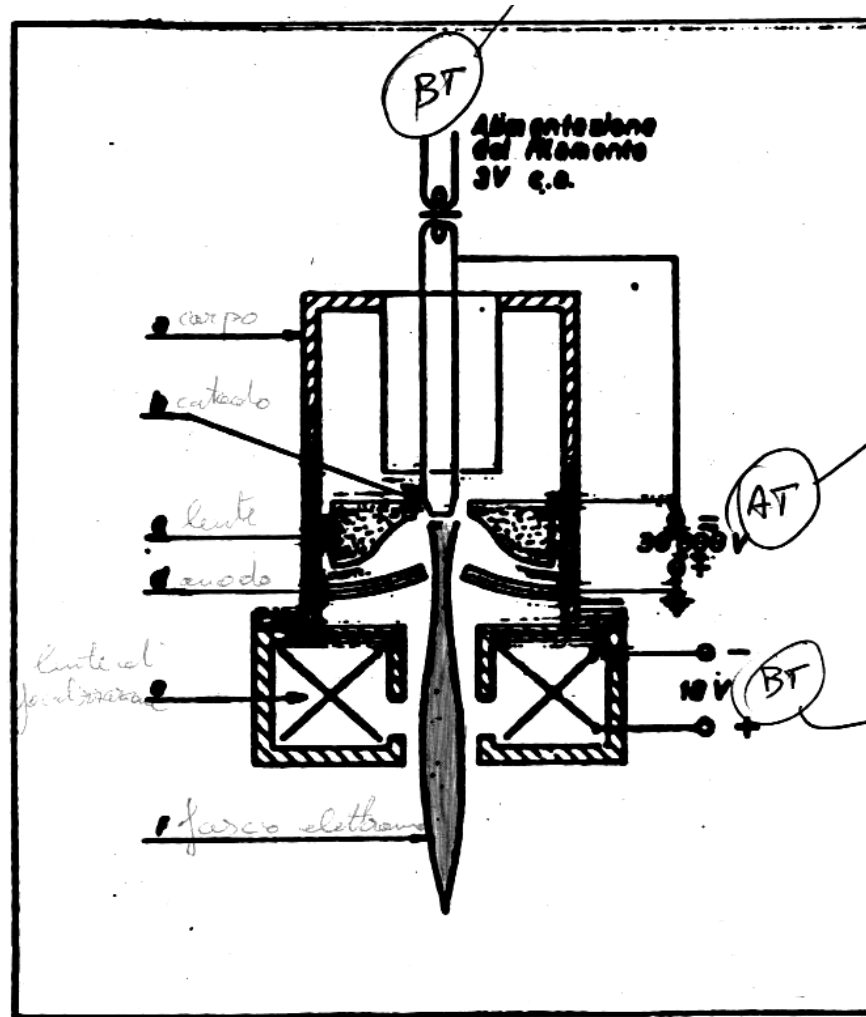


Fig. 7.43 - Schema di cannone elettrico impiegato per le lavorazioni con fascio elettronico:
a - corpo del cannone
b - catodo (filamento)
c - lente Wehnelt
d - anodo
e - avvolgimento di focalizzazione
f - fascio elettronico .

Saldatura

- **La lavorazione più eseguita è la saldatura, sia pure con limitazioni riguardanti materiali ferrosi e spessori (Acciaio: spessore massimo = 50 – 60 mm; spessore minimo = 0,05 mm; Leghe Leggere: spessore massimo = 150-200 mm): il materiale viene congiunto fondendo il lembi dei pezzi in lavorazione e penetrando a fondo nel materiale; generalmente non viene usato materiale d'apporto.**
- **Questo processo può essere usato per scaldare sia i materiali comuni che i materiali refrattari e le varie superleghe che è impossibile saldare per altre vie.**
- **L'apporto di calore in questo tipo di saldatura, è molto minore che in altri tipi di saldature convenzionali, ma assai concentrato**

Tipi di saldatura

Tipo di saldatura	Area minima del punto [cm²]	Energia specifica massima W/cm²
Ossiacetilenica	10^{-2}	$5 \cdot 10^4$
Elettrica ad Arco	10^{-4}	$1 \cdot 10^5$
Fascio Elettronico	10^{-7}	$5 \cdot 10^8$

Foratura

- Nella micro saldatura, la velocità di rimozione del metallo, è di circa 0,01 mm/s, l'asportazione è perciò lenta, ma la lavorazione è molto accurata, infatti non vi sono zone nel pezzo in lavorazione, in cui la struttura abbia risentito dell'azione del calore o della pressione e possono quindi essere rispettate tolleranze di lavorazione, strettissime.
- Limitazioni del processo sono date dall'alto costo delle attrezzature, dalla necessità di operai qualificati e dall'impiego di una camera a vuoto che restringe le dimensioni massime del pezzo da lavorare.
- Il procedimento, inoltre, emette raggi X, il che richiede una schermatura opportuna, per assorbire le radiazioni. Attualmente l'EMB viene impiegato per:
 - fori di diametro piccolissimo (circa 0,05mm) in qualsiasi materiale conosciuto;
 - per la formazione di particolari piccolissimi nell'industria dei semiconduttori;
 - per la lavorazione di diamanti industriali;

- **Vantaggi**
 - Profondità di penetrazione elevatissime (fino a 40 volte la larghezza del pezzo);
 - Grande velocità di avanzamento (circa 500 mm/min);
 - Limitata estensione della zona riscaldata;
 - Possibilità di saldare materiali dissimili;
 - Applicazione della lavorazione a pezzi meccanici già finiti;
 - Saldabilità di tutti i materiali, anche di quelli fortemente ossidabili (Berillio, Titanio, Zirconio, ecc.);
 - Saldature molto precise;
 - Assenza di ossidazioni e/o alterazioni.
- **Le pressioni di vuoto raggiunte nella camera, vanno da 10⁻² a 10⁻⁵ Torr (mmHg), a seconda della zona della camera; il tipo di vuoto utilizzato nella lavorazione, viene chiamato *vuoto spinto*, in quanto una volta creata una depressione opportuna all'interno della camera, intervengono dei sali che reagiscono con l'aria, aumentando ulteriormente il vuoto.**
- **Nella zona di lavorazione, la pressione di vuoto deve essere di almeno 10⁻⁴ Torr**
- **Gli elettroni sparati dal cannone, raggiungono una velocità compresa fra i 50000 e i 200000 Km/s.**

Plasma

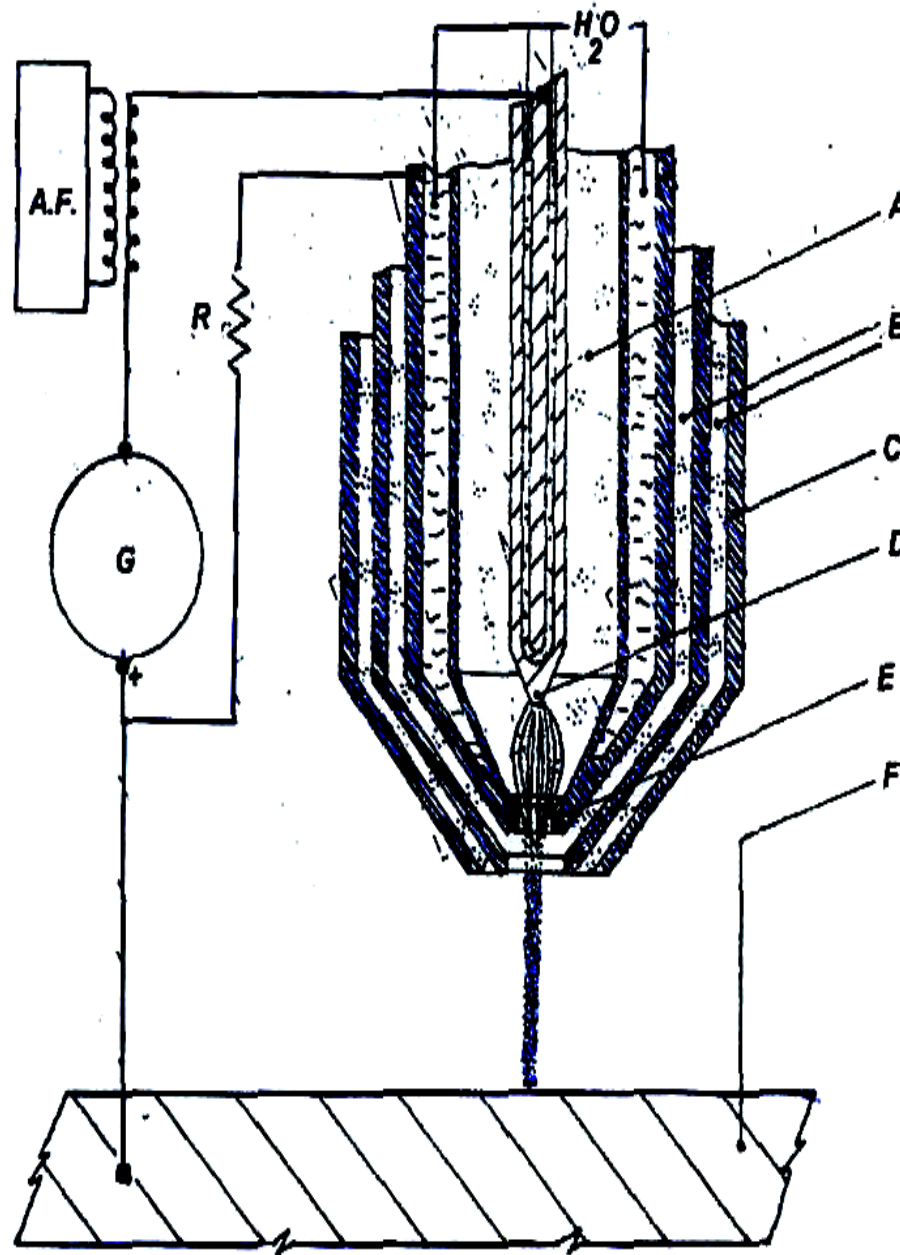
PAM – Plasma Arc Machinery

PAM – Plasma Arc Machinery

- **Se un gas neutro viene riscaldato sino a raggiungere una temperatura che ne aumenti l'energia cinetica oltre un livello “critico”, gli atomi e le molecole di tale gas, urtandosi, liberano elettroni che si muovono per un breve tempo completamente svincolati dalle orbite descritte abitualmente attorno al nucleo di appartenenza**
- **Le molecole e gli atomi privati di tali elettroni si caricano di elettricità positiva e vengono detti per questo ioni. In tali condizioni si genera il plasma.**

PAM Plasma Arc Machning

- **Una differenza di potenziale molto elevata ionizza il gas (elio o azoto) che viene iniettato ad elevatissima pressione nella macchina**
- **Gli ioni createsi hanno una tal temperatura da dare luogo ad uno stato di plasma**
- **Il plasma è ottimo conduttore di energia elettrica e termica per via della grande energia elettrica posseduta dagli elettroni liberi. Viene realizzato artificialmente ai fini produttivi per saldatura, taglio, spruzzatura a caldo ad una temperatura di 5000/50000 K.**
- **A causa della pressione, tale plasma è convogliato attraverso un ugello contro il pezzo per eseguire operazioni di taglio**



Da un elettrodo in tungsteno avente funzione di catodo (D), scocca l'arco elettrico che si dirige verso l'anodo rappresentato dal pezzo (F)

La tensione caratterizzante questo arco è piuttosto bassa (30/150 V); viceversa la corrente continua è decisamente elevata (200/4000A). Torcia (C) ed elettrodo in fusibile (D) sono raffreddati da acqua posta in circolazione in canali ricavati al loro interno.

Superiormente un gas (A) viene introdotto ad una pressione di circa 0,3 Mpa e costretto a passare in un anello di rame (E), con foro calibrato di 2/5 mm, insieme all'arco voltaico diretto sull'anodo (F). A causa sia della tensione esistente, sia del riscaldamento dovuto all'arco, il gas aumenta di volume ma non potendosi espandere liberamente, viene proiettato fuori dall'anello in rame a velocità ultrasonica.

- **In questo breve spazio contiguo alla torcia:**
 - i gas biatomici si scindono in atomi e successivamente vengono dissociati in ioni positivi ed elettroni;
 - i gas monoatomici si trasformano completamente in ioni positivi ed elettroni
- **Quando atomi, ioni positivi ed elettroni raggiungono l'anodo:**
 - gli atomi dei gas biatomici si riuniscono ricomponendo le molecole iniziali, cedendo così notevole energia termica;
 - gli elettroni liberi si uniscono agli ioni positivi, ricomponendo così gli originari atomi dei gas monoatomici
- **Tutto ciò si traduce nella liberazione di un'enorme quantità di energia e in una temperatura del getto di plasma sull'anodo di circa 10000/30000 K.**
- **In quasi tutti i casi è presente un arco ausiliario generato da una corrente ad alta frequenza, finalizzato alla guida e stabilizzazione dell'arco principale in ogni istante e condizione di funzionamento. Costruttivamente si utilizza un gas in pressione che viene fatto convergere sul getto di plasma al fine di contenerlo e concentrarlo.**

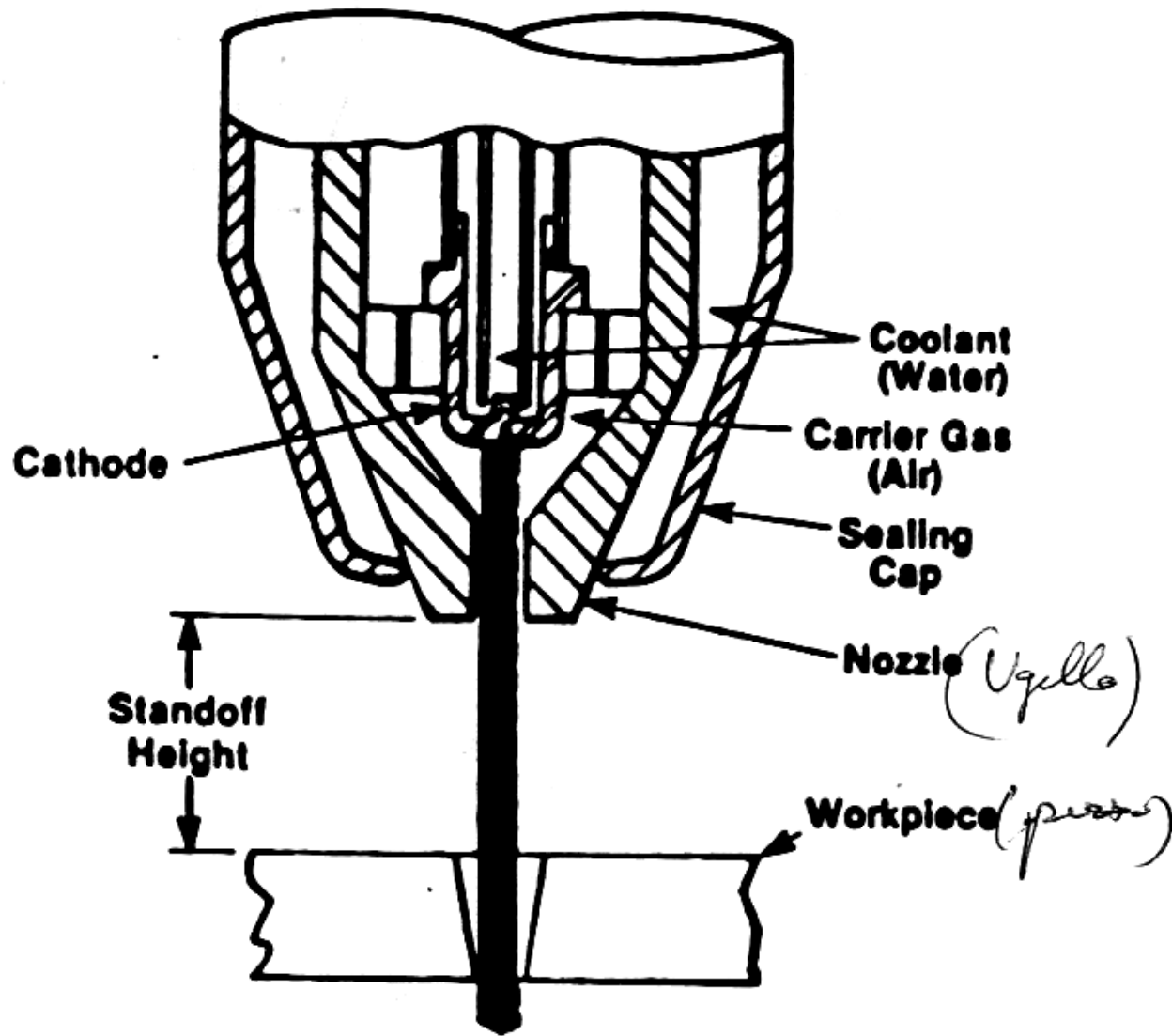


Figure 21.4 Air plasma torch construction (Source: courtesy, W. A. Whitney Corp., Rockford, Ill.).

Schema di PAM - Plasma Arc Machining

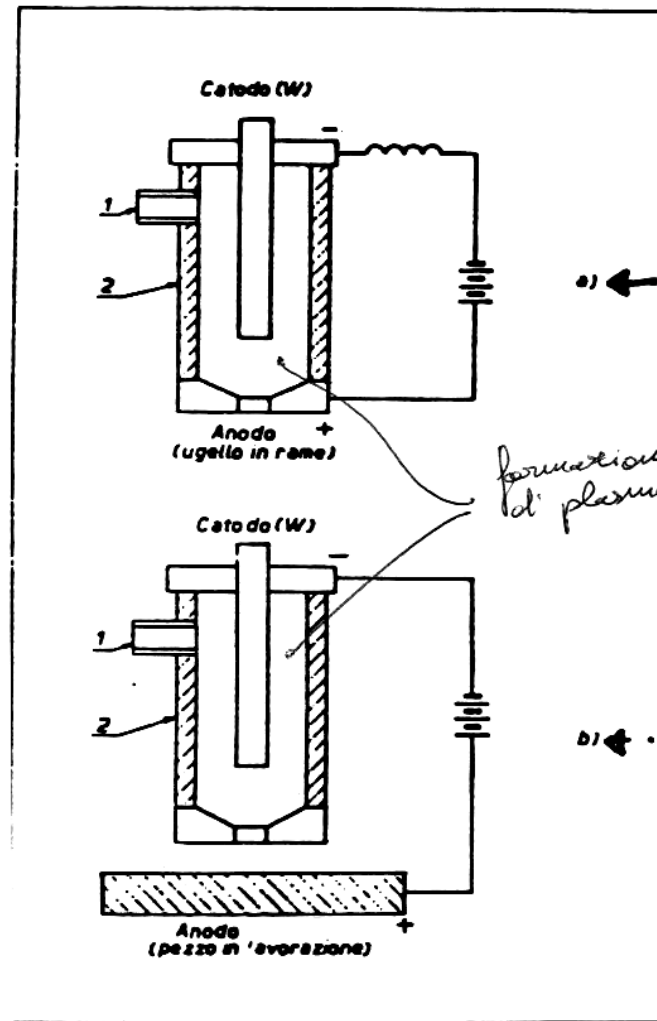


Fig. 7.44 - Schema di funzionamento dell'apparecchiatura a plasma:
 → (a) configurazione ad arco non trasferito (l'ugello è anodo)
 → (b) configurazione ad arco trasferito (il pezzo è anodo).
 1 - ingresso gas (H, N)
 2 - pareti isolanti.

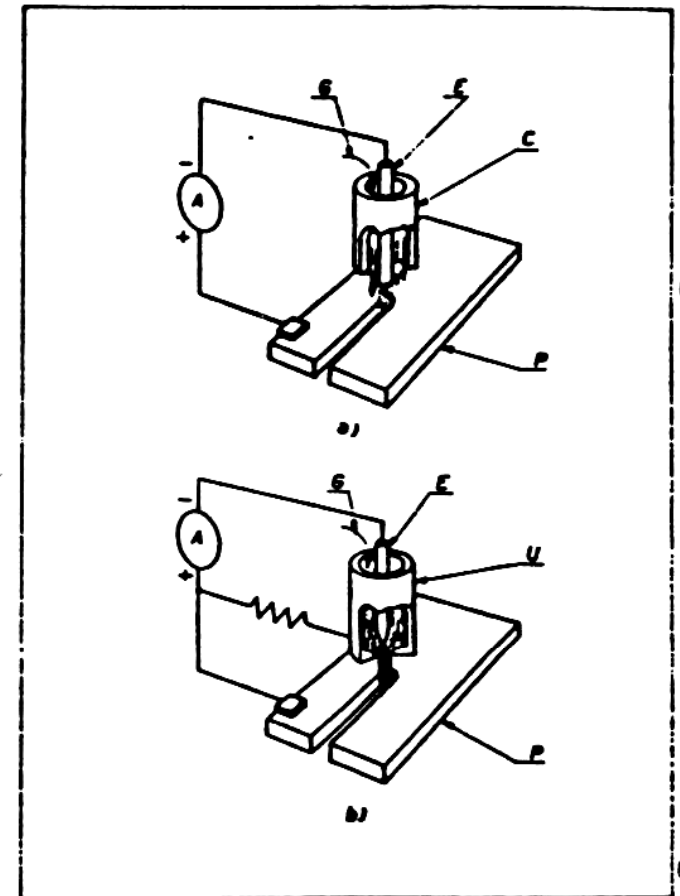
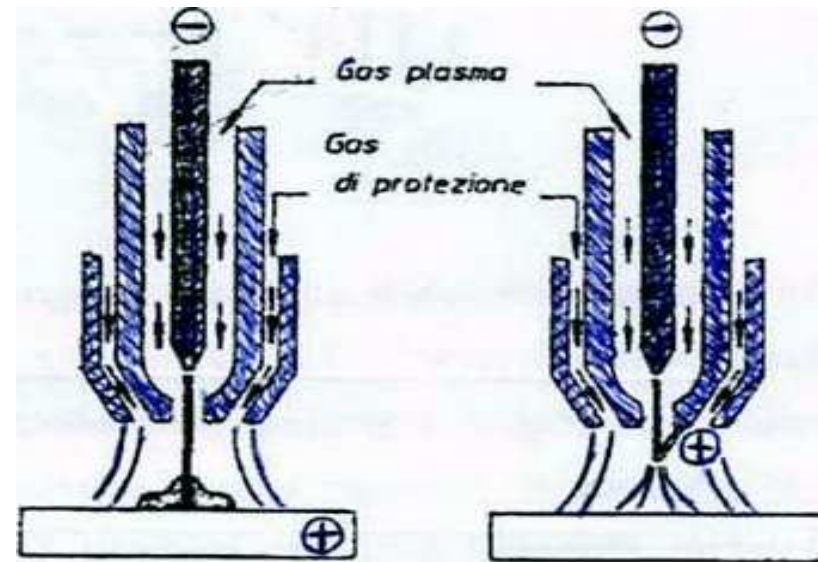
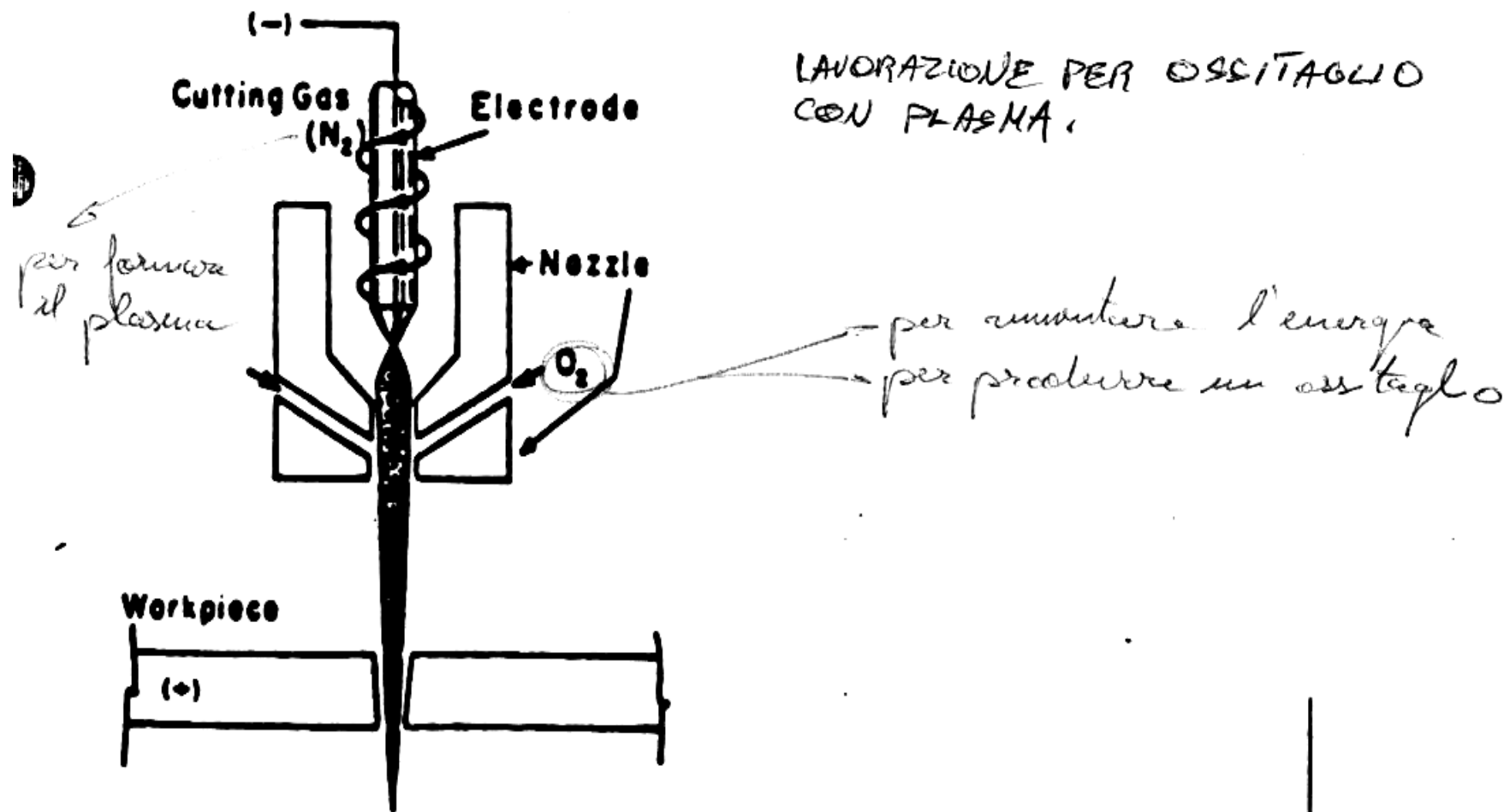


Fig. 7.45 - Rappresentazione schematica dei due principali sistemi di taglio al plasma:
 (a) ad arco trasferito e getto non accelerato
 (b) ad arco trasferito e getto accelerato
 A - alimentatore in corrente continua
 G - gas
 E - elettrodo di tungsteno
 P - pezzo in lavorazione
 C - elemento cilindrico
 U - ugello acceleratore.

Caratteristiche



- **Due versioni di base in base a come viene fatto scoccare l'arco:**
 - **Ad arco trasferito se l'anodo è il pezzo stesso in lavorazione (generalmente più potente). L'arco scocca tra l'elettrodo in tungsteno ed materiale del pezzo e viene usato in saldatura e taglio**
 - **Ad arco non trasferito se esso scocca tra l'anodo che è l'ugello in rame e l'elettrodo. Viene usato per saldare piccoli spessori e per la spruzzatura a caldo.**
- **Si parla di ossitaglio quando l'azoto è utilizzato per creare il plasma ma poi viene accompagnato da ossigeno**



LAVORAZIONE PER OSSITAGLIO
CON PLASMA.

Figure 21.5 Oxygen-injected torch construction (Source: courtesy, Hypertherm, Inc., Hanover, N. H.).

Saldatura al plasma

- **La saldatura al plasma è particolarmente indicata per gli acciai inossidabili, per il rame, per l'ottone, per il titanio, per il nickel, per l'alluminio, per il magnesio**
- **Nel plasma ad arco trasferito si distinguono 2 diversi metodi di saldatura:**
 - **per fusione semplice, con la quale si ottengono saldature di elevata qualità su tutti gli spessori ma particolarmente su spessori di circa 10 mm. Spessori che vanno da 2,5 a 5 mm sono saldabili in una sola passata.**
 - **per fusione passante, che è un tipo di saldatura in cui l'alto potere termico concentrato dell'arco plasma produce nel giunto un foro passante che si richiude progressivamente con lo spostamento della torcia lungo il giunto stesso. Tale processo mostra le sue migliori caratteristiche su spessori compresi tra i 2 e i 10 mm.**

- **Il plasma richiede l'uso di due gas: un gas primario ed un gas secondario**
- **Le funzioni del gas primario sono quelle di regolare il cono plasma, controllare le caratteristiche dell'arco e proteggere l'elettrodo. (generalmente argon)**
- **Le funzioni del gas secondario sono quelle di forzare il passaggio del gas primario nell'orifizio dell'anello in rame tramite la riduzione della superficie utile di passaggio di quest'ultimo e di proteggere il bagno di fusione dall'ossidazione dell'aria. (generalmente elio)**
- **Il processo di saldatura al plasma è un'evoluzione del processo TIG, rispetto al quale, a parità di qualità di saldatura, consente un incremento di produttività. Rispetto ai metodi laser e fascio elettronico si distingue per i bassi costi d'acquisto e di gestione nonché per la più elevata flessibilità d'impiego.**

Taglio al plasma

- **Nel taglio al plasma non si usa un gas protettivo specifico, ma bensì l'aria. Le tensioni di lavoro sono relativamente basse (70/150 V), mentre le correnti sono elevate (200/1200 A), con una potenza termica media elevatissima. In virtù delle altissime temperature che raggiunge (20000/30000 K) ed all'istantanea fusione, l'arco al plasma è adatto al taglio di qualunque metallo ed in particolare dei metalli ad alta temperatura di fusione.**
- **Lo spessore massimo tagliabile è di circa 100 mm e si possono realizzare tagli subacquei a patto di isolare la torcia. I sistemi di taglio al plasma vengono classificati in funzione della densità d'energia in A/cm². Essa abitualmente varia da 1900 a 4300 A/cm².**
- **Nel 1980 venne introdotto l'ossigeno come gas plasma nel taglio degli acciai al carbonio, migliorando la qualità del taglio. Il bordo del taglio è a spigoli vivi, con una minima perdita di materiale ed essendo un taglio molto pulito facilita le operazioni successive come la saldatura. Purtroppo questa soluzione determina un'usura precoce degli elementi consumabili a causa della reazione dell'ossigeno con il materiale dell'elettrodo.**

- **Un problema del taglio al plasma è la formazione dell'arco secondario. Ciò accade quando, in concomitanza con l'arco principale, si sviluppa un ulteriore arco che, generato dallo stesso elettrodo, utilizza a mo di sponda lo schermo di protezione, per poi ricongiungersi, sul pezzo, nell'arco principale. Quando questo accade, l'orifizio dell'ugello subisce gravi danni che determinano una modifica della sua geometria. La formazione dell'arco secondario può essere provocata da:**
 - **taglio praticato troppo vicino al pezzo,**
 - **ugello trascinato sul pezzo,**
 - **portata di gas o intensità di corrente non adeguate.**
- **I metodi di taglio usati sono principalmente 2:**
 - **taglio ad aria compressa, dove viene usata aria compressa a 5 bar come gas ionizzante, e si presta per il taglio di tutti i materiali metallici,**
 - **taglio con iniezione di acqua, dove da gas ionizzante funge l'azoto alla pressione di 10 bar. In questo sistema l'acqua in pressione viene fatta convergere tra anello di rame e parte terminale della torcia in ceramica. L'acqua che fuoriesce dall'ugello raffredda la superficie e funge da antiossidante.**

- **Come per la saldatura, il gas utilizzato nel taglio viene scelto in funzione del metallo da tagliare e da considerazioni di carattere economico. Le miscele più usate sono: argon/idrogeno, azoto/ossigeno/argon, idrogeno/azoto, argon/elio.**
- **A parità di materiale e di spessore, rispetto al taglio ossiacetilenico, il taglio alò plasma consente:**
 - **velocità di taglio superiori,**
 - **taglio di tutte le leghe (non possibile per l'ossiacetilenico),**
 - **livello di finitura del taglio nettamente superiore.**
- **Unico contro è da riscontrarsi nello spessore massimo di taglio che per il taglio ossiacetilenico è maggiore.**

Spruzzatura al plasma

- **Lo stato di plasma viene impiegato anche per il processo di spruzzatura di materiale fuso. Detto materiale viene ridotto a minuscole gocce e quindi depositato su materiali (anche non metallici) al fine di ricoprire la superficie del pezzo sottoposto al processo di lavorazione. In questo tipo di lavorazione i materiali destinati alla copertura del pezzo pervengono alla pistola tramite il condotto sotto forma di filo, polvere o palline.**
- **Il materiale, passando attraverso un arco al plasma che lo fonde, viene ridotto in microgocce. Mediante un getto propulsivo dovuto ad un gas ausiliario immesso nella manichetta, il materiale fuso attraversa uno speciale ugello venendo spruzzato sul pezzo in rotazione. Come gas viene utilizzata aria compressa deumidificata, impiegata sia come gas primario sia come gas propulsore.**

Lavorazioni con getto abrasivo

AJM - Abrasive Jet Machining

AJM - Abrasive Jet Machining

- **L'asportazione di materiale avviene per l'impatto di un getto di particelle abrasive sul materiale in lavorazione**
- **Le applicazioni sono molteplici:**
 - **Fori e fessure spesso da maschiare successivamente**
 - **Materiali molto duri (metallici e non)**
 - **Fori molto conici senza spigoli e angoli acuti**
- **Si fa uso di abrasivi diversi in funzione delle lavorazioni da effettuare e dei materiali trattati:**
 - **Ossido di alluminio per pulitura e taglio**
 - **Carburo di silicio per pulitura e taglio di materiali molto duri**
 - **Grani di vetro per lucidatura e pulitura**
 - **Bicarbonato di sodio per pulitura e taglio di materiali teneri**

AJM - Abrasive Jet Machining

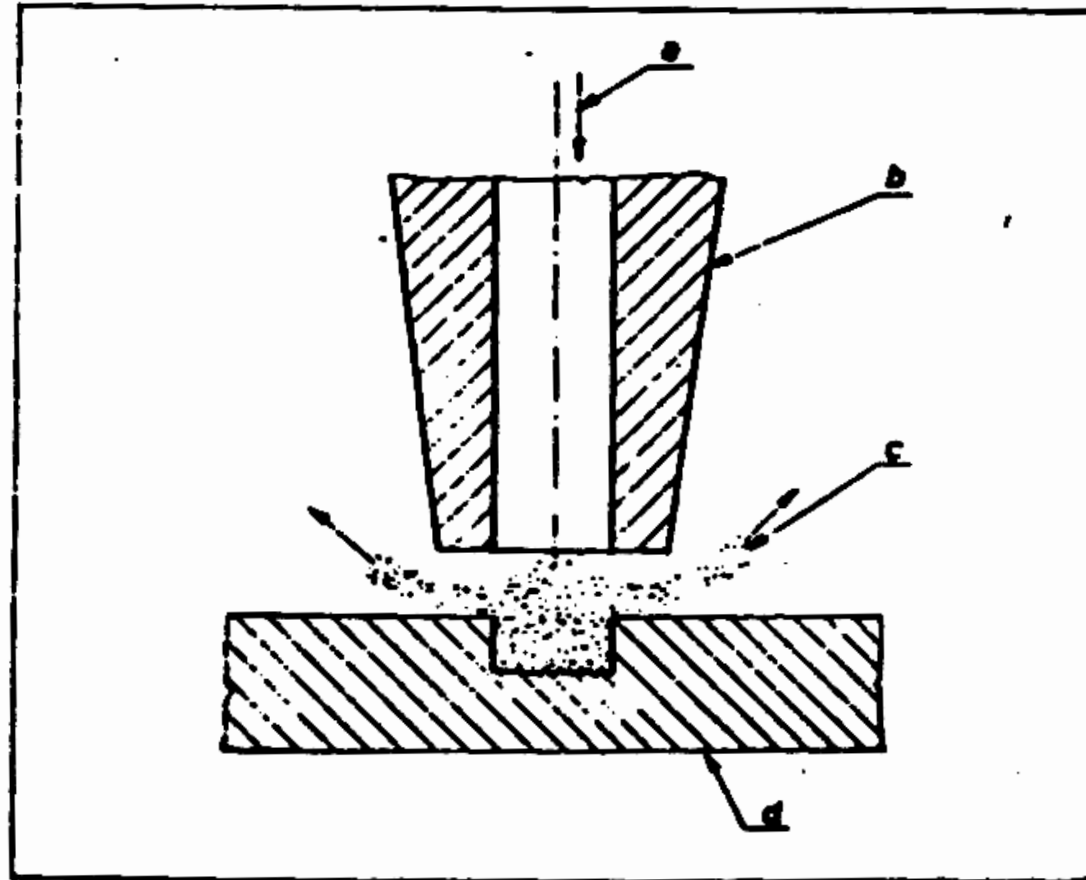


Fig. 7.24 - Taglio con getto abrasivo impiegando particelle di ossido di alluminio da $15 + 40 \mu\text{m}$
a - aria e particelle di abrasivo in entrata
b - ugello in carburo di tungsteno (diametro interno circa 0,45 mm)
c - aria e particelle di abrasivo in uscita
d - pezzo in lavorazione.

Caratteristiche

- **La macchina è soggetta ad una usura elevatissima a causa dell'uso dei materiali abrasivi**
- **Tipico è l'uso di getti di abrasivi per le lavorazioni sui microchip**
- **È possibile utilizzare un getto di acqua ad altissima pressione in luogo di un getto di materiali abrasivi nel caso di materiali teneri: da qui si sviluppa la tecnologia detta appunto Water Jet**

Lavorazioni Water jet

WJ – Water Jet

AWJ – Abrasive Water Jet

- **Il taglio a getto d'acqua è una tecnologia di taglio che utilizza un getto d'acqua ad altissima pressione (fino a 7.000 Bar) per tagliare numerose tipologie di materiali**
- **Il taglio waterjet abrasivo e ad acqua pura sta guadagnando la popolarità come utensile per tagliare una ampia varietà di materiali. Facilità di programmazione, costi contenuti di taglio e la possibilità di tagliare pressoché tutti i materiali da pochi decimi di millimetro fino a spessori di 15 cm con precisione del decimo di millimetro ne ha fatto una macchina essenziale per numerose tipologie di aziende per diverse applicazioni**
- **L'acqua funge da vettore per le particelle di abrasivo che consentono di ottenere quasi una lappatura superficiale consentendo di ottenere un grado di finitura che non necessita alcuna altra operazione aggiuntiva**
- **Si possono lavorare fino a 100 mm di spessore di alluminio**

- **La tecnologia a idrogetto è in grado di tagliare qualsiasi tipo di materiale, con spessori fino a circa 150 mm (15 cm), con un'elevata precisione di taglio (dell'ordine di 1/10 di mm per spessori fino a 40 - 50 mm). Il taglio ad acqua non provoca alcuna alterazione fisica o deformazione meccanica del pezzo e consente di tagliare materiali di spessore non uniforme e materiali compositi o stratificati. La larghezza del solco di taglio è molto contenuta permettendo di ottenere la minima quantità di materiale asportato. L'idrogetto consente il taglio di materiali pre-verniciati e/o rivestiti con pellicola di protezione inoltre le superfici originate dal taglio presentano poche sbavature.**
- **La tecnologia a idrogetto può tagliare tutti i materiali che il taglio a Laser non sarebbe in grado di tagliare senza danneggiare (gomma, sughero, pelle, cuoio, materiali espansi, plastica, legno, fibre di carbonio, ecc.) fino a spessori di 200 mm.**
- **Altri materiali lavorabili sono: titanio, ottone, rame, acciaio inox, alluminio, vetro, marmo, ceramica, ecc...**
- **Aggiungendo sostanze abrasive all'acqua è possibile tagliare spessori maggiori o materiali più duri con maggior velocità.**
- **Il taglio a getto d'acqua è un taglio a freddo, quindi non altera le caratteristiche chimico fisiche del materiale tagliato. È possibile tagliare forme in 2D di qualsiasi sagoma con precisioni di $\pm 0,1$ mm.**

Table 2.1 The AJM Abrasives and Their Application

Abrasives	Applications
Aluminum oxide	Cleaning, cutting, deburring
Silicon carbide	As above but for harder materials
Glass beads	Matt polishing, cleaning
Crushed glass	Peening, cleaning
Sodium bicarbonate	Cleaning, cutting, soft materials

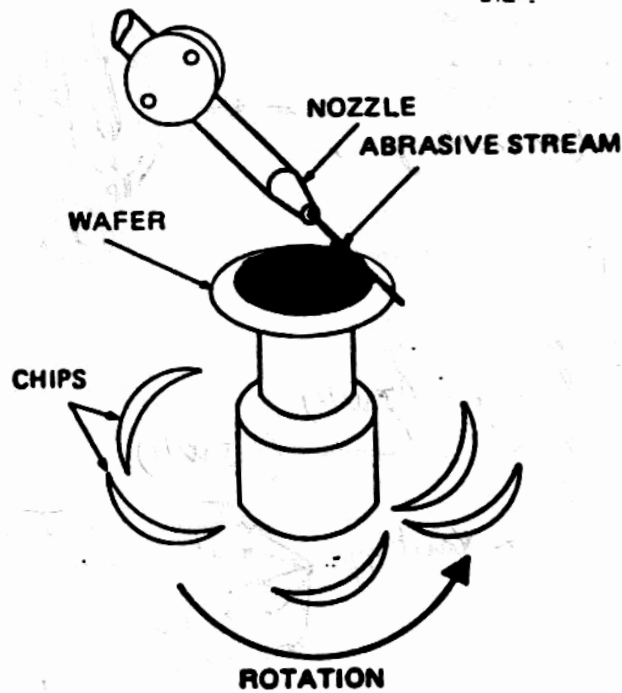


Figure 2.11 Technique used for AJM-trimming of silicon/tungsten disks.

Tab. 7.X - *Velocità di taglio mediante getto liquido per vari materiali*

Materiale	Spessore (mm)	Pressione (MPa)	Velocità di taglio (m/sec)
Nido d'ape in alluminio	25	420	0,85
Tappetino automobilistico	1 strato	420	3,00
Vinile automobilistico	13 strati	420	4,25
Ferodo	13	420	0,42
Velluto a coste	14 strati	420	1,90
Tessuto crespo	100 strati	420	4,25
Cloruro di etil-polivinile	3,2	350	0,20
Tessuto di nylon per pneumatici	0,8	420	4,25
Compensato	6,4	420	1,70
Materiale per guarnizioni al polipropilene	40	420	2,50
Polipropilene (40%) rinforzato con fibre di vetro	6,4	420	0,12
Carta velina	2 strati	100	180
Impiallacciatura di legno	2,5	420	4,25

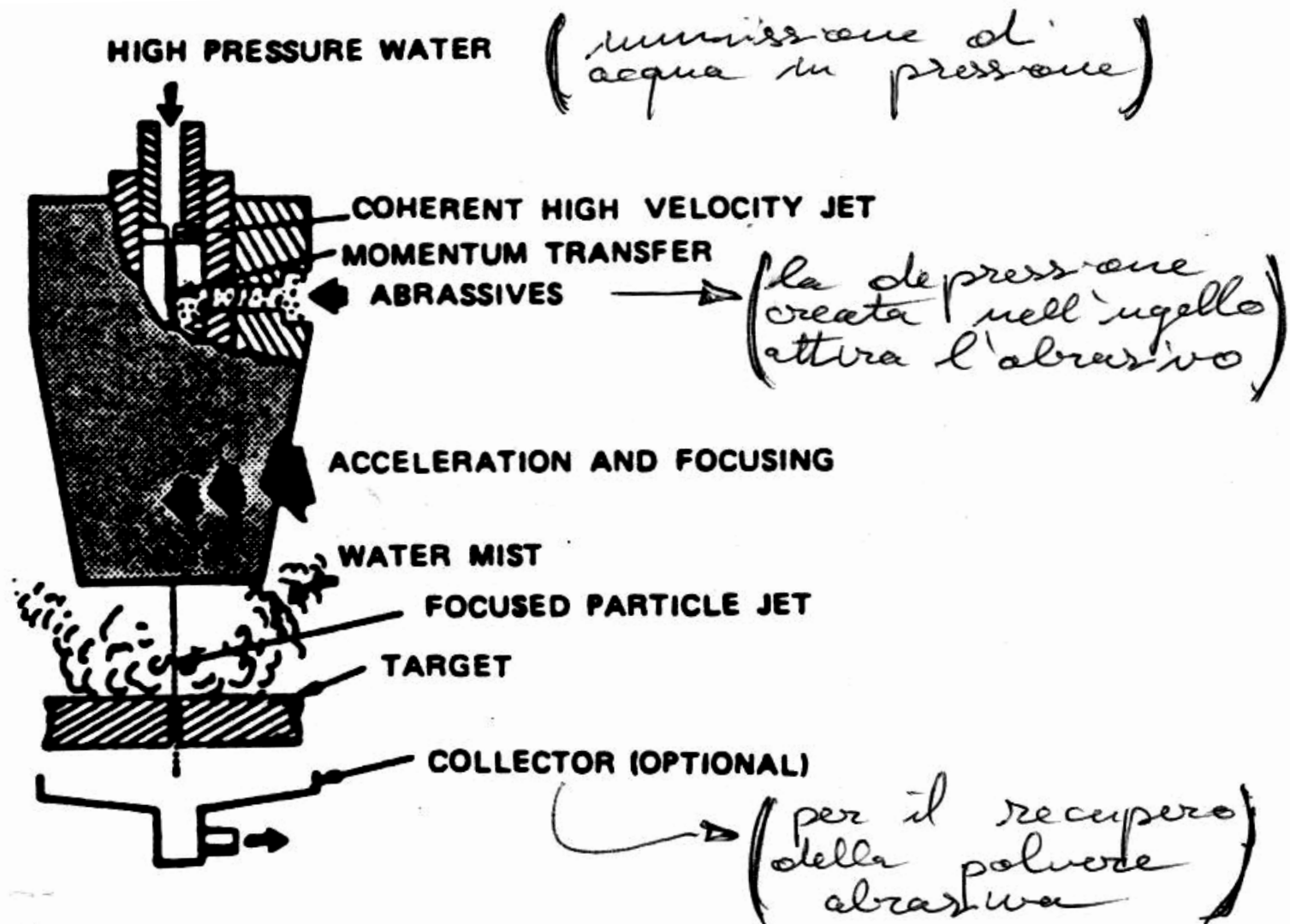


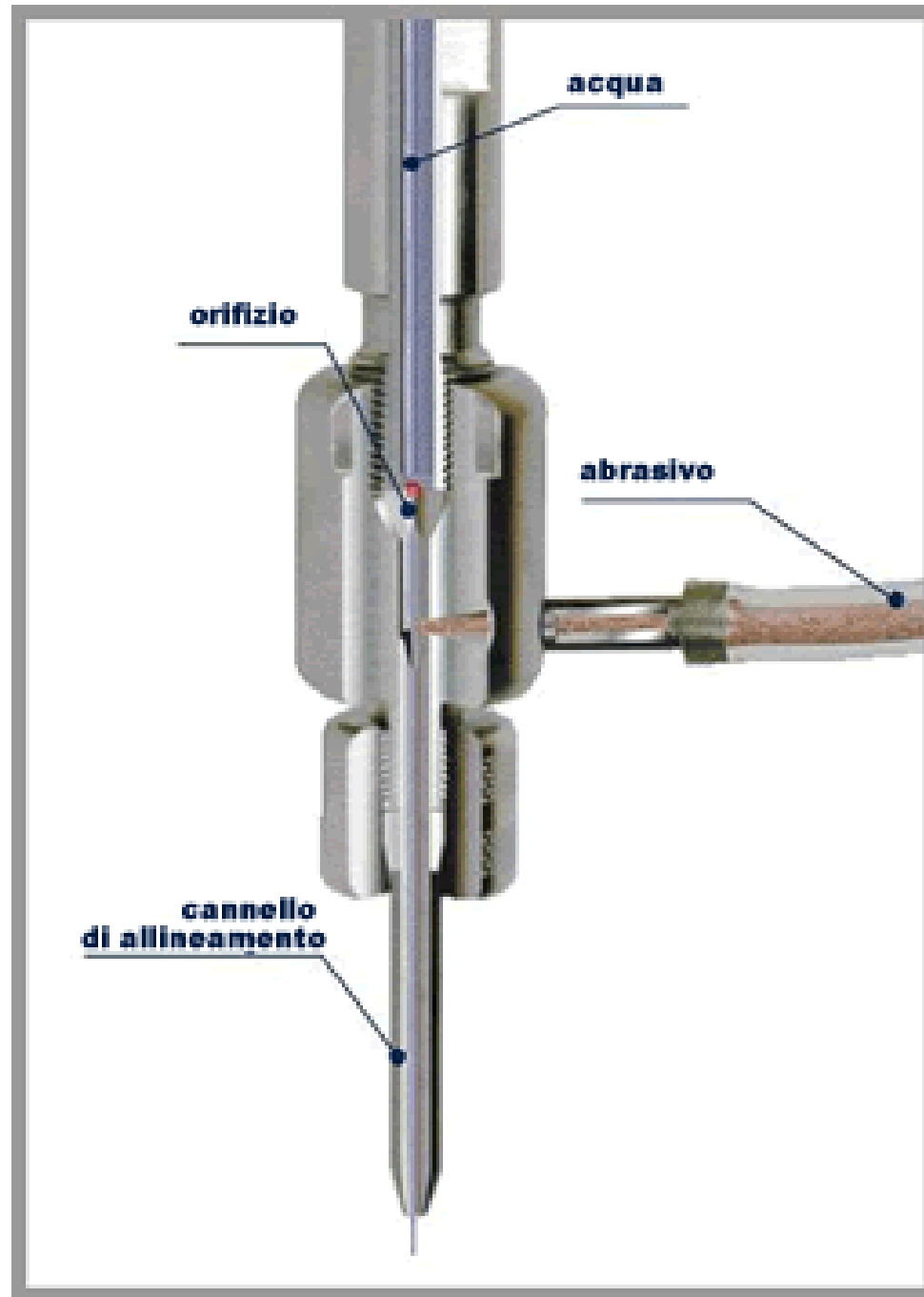
Figure 4.1 Diagram of the AWJM process. (Source: courtesy, Flow Industries, Inc., Kent, Wash).

Caratteristiche

- **Esiste il problema del dosaggio della polvere nell'acqua;**
 - **Se è troppa l'usura dell'ugello avviene in tempi rapidissimi**
 - **Se è poca non riesce ad erodere il materiale in lavorazione**
- **Esiste anche il problema del posizionamento e del dimensionamento dell'ugello di apporto dell'abrasivo in quanto quest'ultimo viene aspirato dalla depressione causata dal passaggio dell'acqua**
- **La polvere abrasiva utilizzata viene generalmente filtrata e riciclata**
- **Componenti essenziali della macchina sono l'accumulatore ove l'acqua viene prelevata e stoccata prima di essere inviata all'intensificatore ad olio che si comporta come una pompa a doppio effetto**

- **Il taglio a getto d'acqua ad altissima pressione rappresenta certamente la tecnologia più innovativa e avveniristica introdotta sul mercato negli ultimi anni in grado di ottimizzare i processi di taglio su una gamma infinita di materiali**
- **Consiste nel creare un getto d'acqua alla pressione di oltre 4000 atm mediante una pompa intensificatrice**
- **L'acqua viene spinta a tale pressione nella testa di taglio comandata da un dispositivo a controllo numerico.**
- **L'acqua viene quindi espulsa attraverso un orificio calibrato a oltre 3 volte la velocità del suono ed è nel mentre mescolata ad un abrasivo**
- **Tale tecnologia permette il taglio di qualsiasi sagoma e di tutti i materiali fino ad uno spessore massimo di 150mm**

Schema di funzionamento



Macchine Water Jet

- **Le macchine a tecnologia water jet, con l'impiego flessibile del getto d'acqua misto a sostanza abrasiva, permettono la lavorazione di materiali e spessori non lavorabili con procedimenti tecnici tradizionali, come metalli particolari, leghe, materiali sintetici, vetro acrilico, materiali rivestiti e stratificati, legno, gomma, pietra e ceramica**
- **Le lavorazioni di tipo water jet consentono altri notevoli vantaggi:**
 - **non implicano emissioni di polveri o gas**
 - **producono spigoli di taglio che non necessitano di alcuna rifinitura**

ABRASIVE WATER JET MACHINING (AWJM)

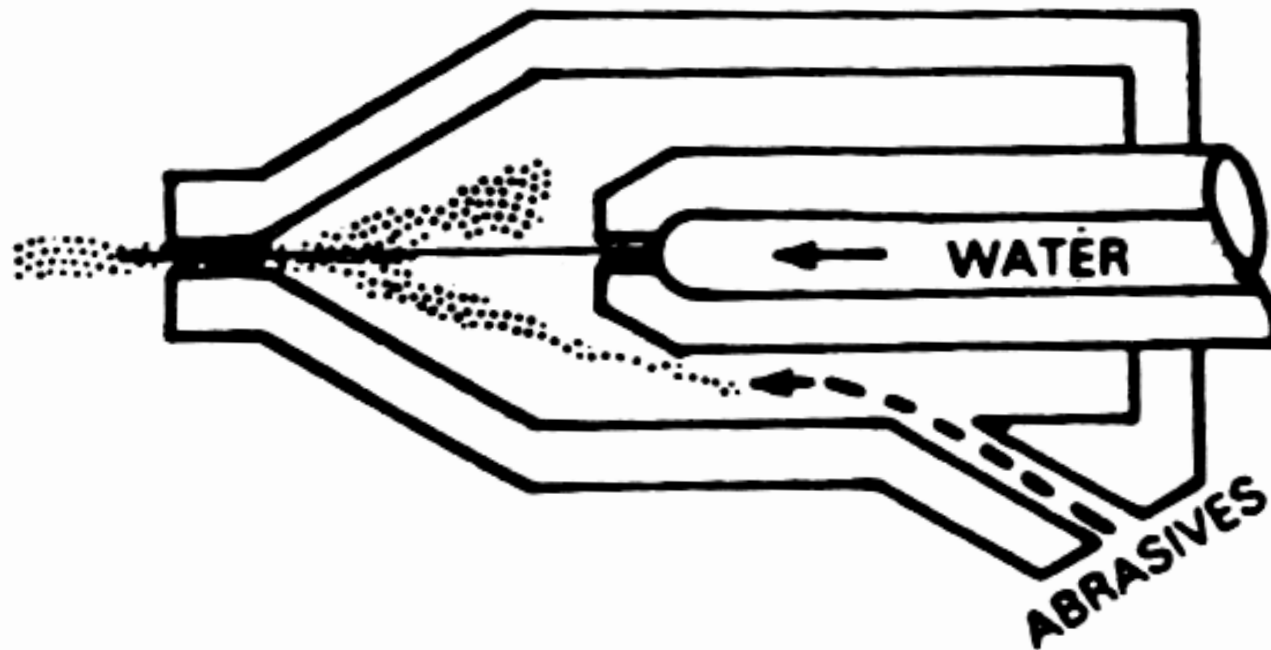
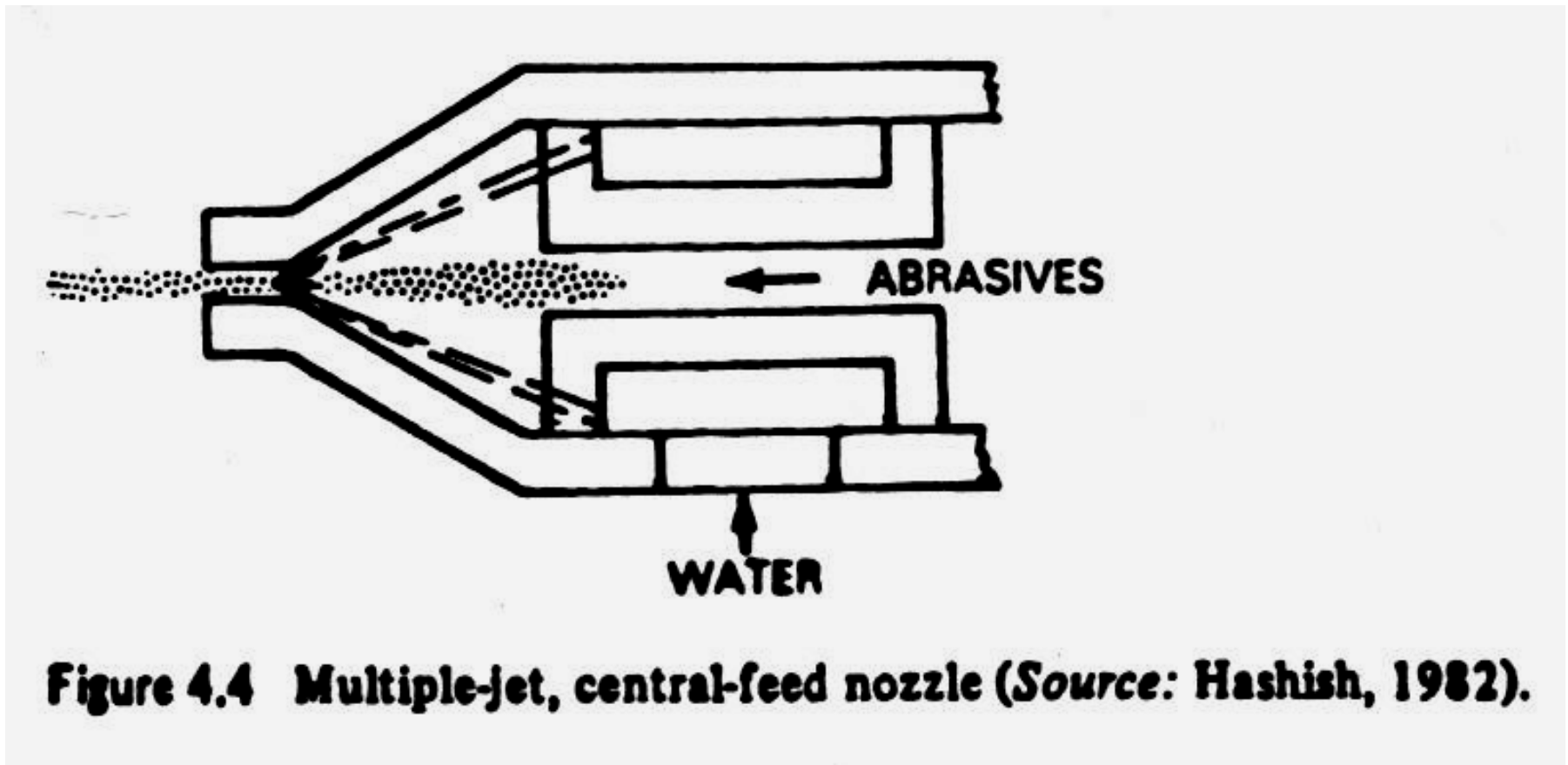


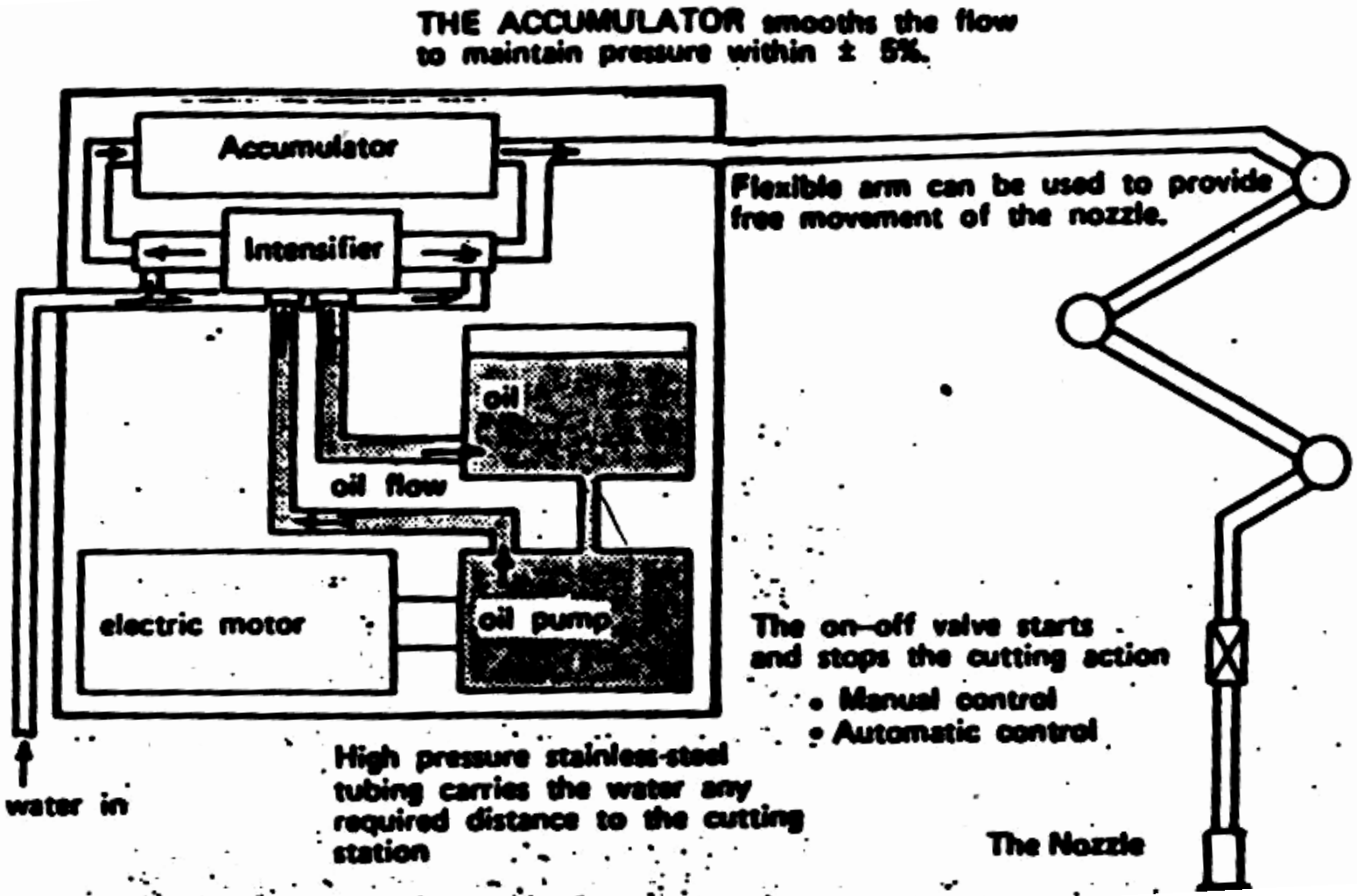
Figure 4.3 Single-jet, side-feed nozzle (*Source: Hashish, 1982*).



Vantaggi

- **Il getto d'acqua deve essere indirizzato esattamente nel punto in cui si vuole tagliare**
- **L'ugello di taglio è realizzato solitamente in zaffiro o diamante artificiale**
- **Grazie alla velocità superiore a quella del suono, il getto perfora istantaneamente il materiale**
- **I vantaggi principali del taglio a getto d'acqua sono:**
 - **taglio puntuale e non tangenziale**
 - **sezione del taglio molto piccola dato che il diametro del getto è compreso tra 0.11 e 0.5 mm**
 - **minima forza di trascinamento del materiale**
 - **energia di taglio "modulabile" attraverso la scelta delle pressione di lavoro e della sezione dell'ugello di taglio.**

- **Il getto può essere addizionato di abrasivo di vario genere in ragione del materiale da tagliare e, opportunamente indirizzato contro la superficie del pezzo in lavorazione, determina la separazione delle parti tramite una duplice azione:**
 - Di erosione
 - Di abrasione
- **La pressurizzazione dell'acqua è realizzata da una speciale pompa volumetrica azionata idraulicamente detta "intensificatore di pressione", che costituisce di fatto il cuore del sistema di taglio**
- **La pompa è alimentata da motori elettrici di potenze comprese tra i 20 ed i 100 CV**



- **Il taglio a getto d'acqua è il sistema che consente di raggiungere le velocità di lavoro più alte in assoluto. Pertanto è quella potenzialmente più adeguata ad un utilizzo del taglio in continuo per elevata produzione**
- **Le macchine sono spesso dotate di un software di piazzamento molto sofisticato che consente di ottimizzare automaticamente o in maniera interattiva i layout**
- **Gli impianti possono essere configurati in modi diversi per massimizzare l'efficacia della soluzione, ad esempio è possibile dotarli di proiettore per una rapida identificazione delle parti tagliate**

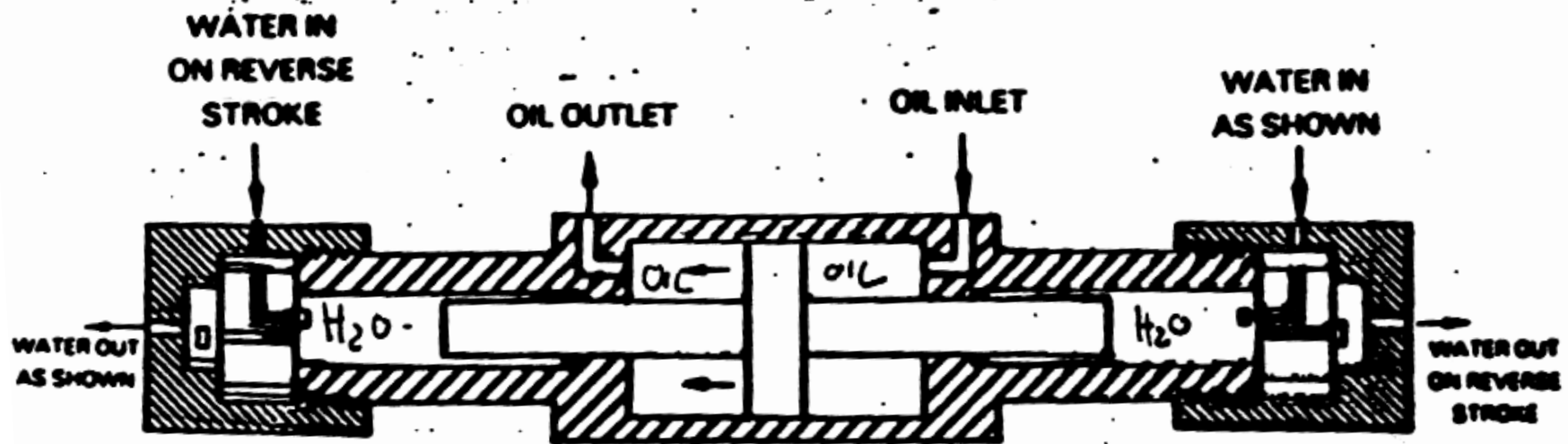


Figure 3.3 The WJM high-pressure oil intensifier construction (Source: courtesy, Flow Systems, Inc., Kent, Wash.).

- **È importante sottolineare il fatto che questa tecnologia di taglio non è inquinante, sempre che l'abrasivo utilizzato sia un minerale inerte assolutamente naturale**
- **L'assenza di fumi e polveri assicura maggiore benessere negli ambienti di lavoro ed esclude i rischi tipici dei sistemi tradizionali.**
- **Per la marcatura dei difetti e la digitalizzazione del contorno dei materiali esistono dispositivi accessori che permettono di trasmettere in modo estremamente semplice e veloce i dati necessari al sistema di piazzamento.**

Lavorazione Chimiche

CHM

- **Applicazioni**
 - Taglio
 - Finitura (piccoli strati di materiale)
 - Fresatura (Alleggerimento)
- **Le lavorazioni chimiche (CHM), permettono di asportare in maniera controllata (atomo per atomo), il metallo dalla superficie di un pezzo mediante l'attacco diretto di soluzioni chimiche capaci di dissolvere il materiale in lavorazione.**
- **Le principali lavorazioni sono:**
 - tranciatura chimica
 - fresatura chimica
- **In entrambe, il pezzo, viene spruzzato o immerso (a seconda delle dimensioni) con una soluzione capace di convertire il metallo in un sale metallico che viene allontanato mediante il continuo rinnovo della soluzione reagente;**
- **la composizione e la concentrazione della soluzione, sono scelte in modo che la velocità di asportazione sia di circa 0,02 mm/min**
- **Per poter attaccare il materiale solo in alcune zone, occorre proteggere le parti che non devono essere lavorate, con un materiale chimicamente inerte come *neoprene, plastica vinilica, emulsioni fotosensibili ecc.***

Lavorazioni Chimiche

Materiale	Soluzione	Velocità [mm/min]	Rugosità [μm]
Alluminio	NaOH – NaCl	0,05 – 0,12	5 – 15
Acciaio	HNO ₃ – HCl	0,012 – 0,04	2 – 15
Rame	HNO ₃ – NH ₄ OH	0,02 – 0,08	3 – 5
Titanio	HF	0,01 – 0,03	1 – 4

Tranciatura chimica

- **E' impiegata per produrre particolari metallici sottili:**
 - Pulizia accurata di ogni traccia di sporco, grasso o ruggine;
 - Ricopertura del pezzo con emulsione fotosensibile e successiva polimerizzazione mediante esposizione a raggi UV (in precedenza si è ricoperto il film con un'immagine opaca della tranciatura da effettuare, per proteggerla dai raggi);
 - Essiccazione in forno;
 - Attacco chimico.
- **Vantaggi:**
 - I lamierini molto sottili (qualche decimo di mm) possono essere lavorati senza distorsioni;
 - La lavorazione non lascia bave;
 - Possono essere lavorati materiali duri e fragili;
 - Costo di attrezzature e impianto, ridotto;
 - La modifica dei progetti non richiede grandi spese;

Fresatura chimica

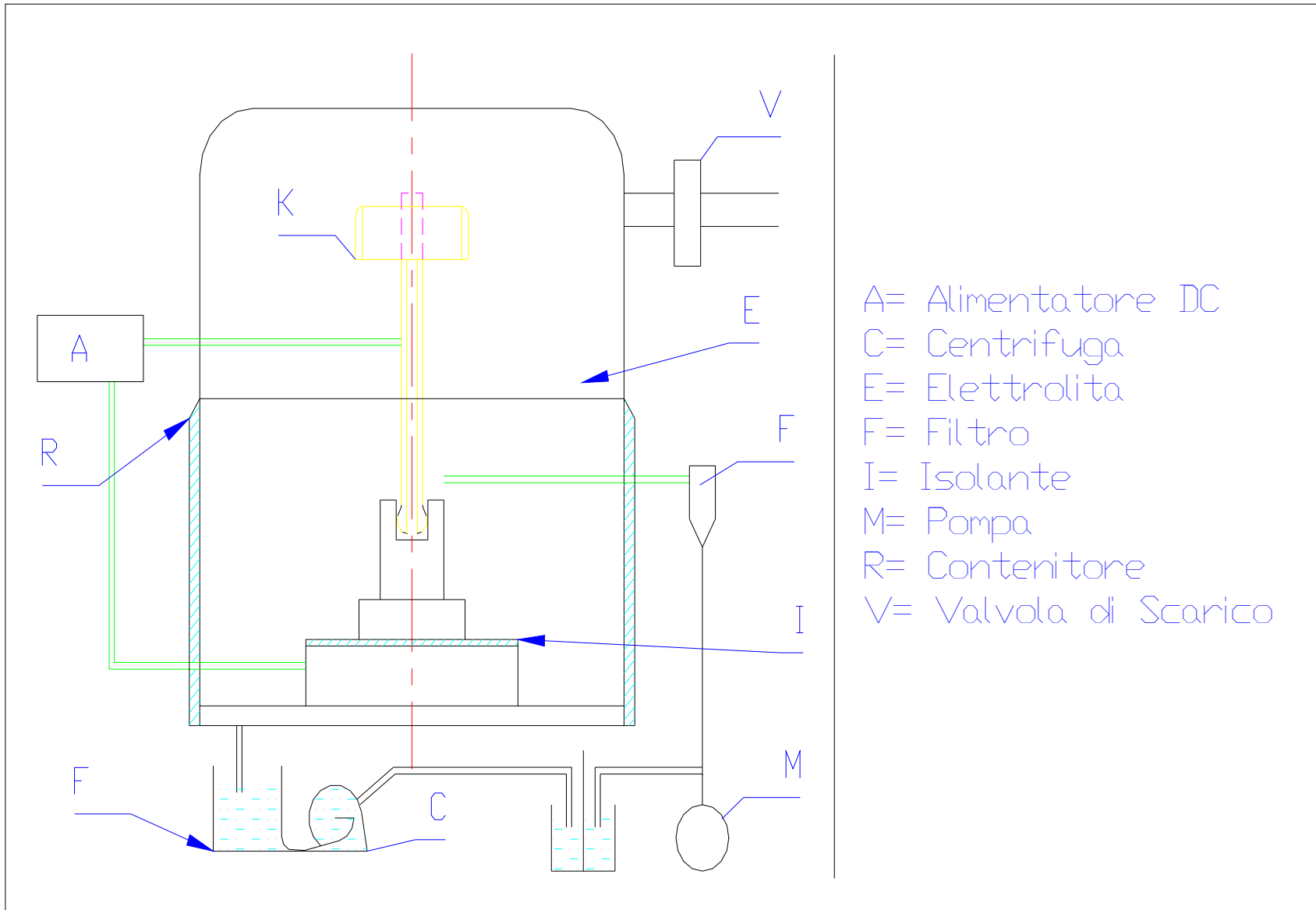
- **La fresatura chimica, è un processo di attacco chimico controllato, in cui il metallo, viene asportato in modo da produrre figure complesse, particolari alleggeriti, lamiere a spessore variabile.**
- **Questo procedimento ha avuto grande sviluppo nell'industria aeronautica, applicata essenzialmente alle leghe d'alluminio.**
- **Il processo, relativamente semplice, consiste nella pulizia accurata (decapaggio), della lamiera o del pezzo da attaccare; si procede poi a mascherare le aree che non devono essere lavorate con pellicole resistenti all'attacco chimico.**
- **Il pezzo viene poi immerso in una soluzione alcalina calda, dove il materiale viene eroso nelle aree non protette.**
- **Il particolare viene poi risciacquato e successivamente viene rimossa la mascheratura**

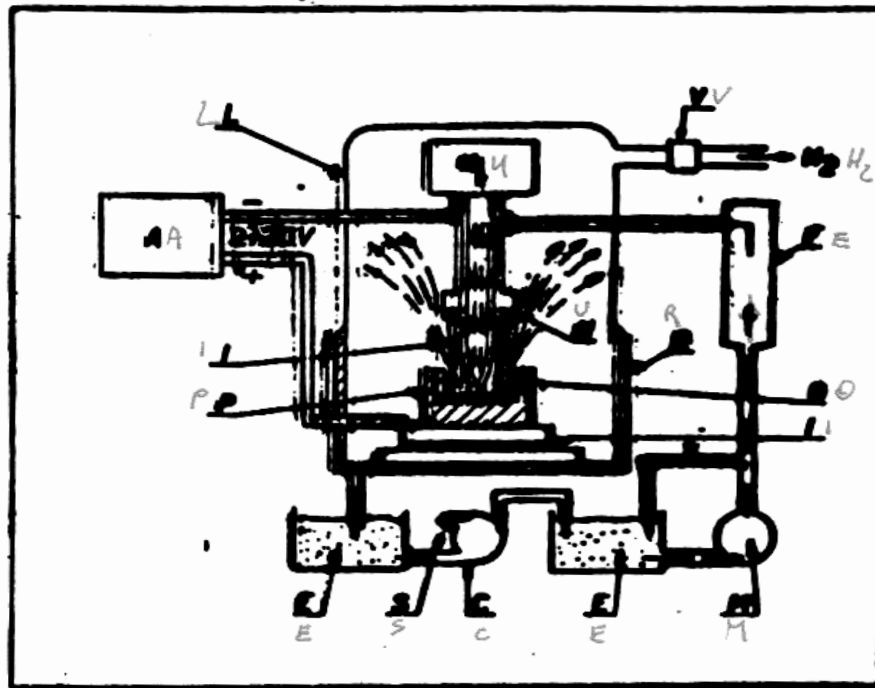
Lavorazione elettrochimica

ECM

- **E' un processo simile all'elettroerosione, in quanto implica il passaggio di corrente attraverso un elettrolita, interposto fra un utensile di forma opportuna, e il pezzo; la differenza sta nel fatto che nelle lavorazioni elettrochimiche viene sfruttato il principio dell'elettrolisi (fino a 1000 A/cm^2).**
- **Nell'ECM, (utilizzabile con qualsiasi materiale purché conduttore), la quantità di metallo asportato è indipendente dalla durezza e dalla resistenza del pezzo e da qualsiasi altra sua proprietà fisica;**
- **la velocità di asportazione (decine di migliaia di mm^3/min), supera largamente quella relativa all'EDM e in alcuni casi anche quelle delle lavorazioni convenzionali.**
- **Se le condizioni di lavorazione sono scelte correttamente, cioè se non si ha formazione dell'arco, non si produce usura dell'utensile, non si determinano tensioni residue e nemmeno danni termici al materiale in lavorazione, poiché le temperature non superano in nessun caso i 100°C .**

- **Caratteristiche delle Lavorazione ECM:**
- **Un generatore di corrente continua è collegato al sistema utensile-pezzo: viene applicata una ddp fra utensile (catodo) e pezzo (anodo), immersi in un elettrolita che ne provoca l'erosione; la forma del pezzo in lavorazione è determinata dalla formula dell'utensile e dal moto relativo fra utensile e pezzo durante la lavorazione. La finitura superficiale, aumenta all'aumentare della corrente.**
 - **V= 10-20 V dc**
 - **I= fino a 20000 A**
 - **P= 50 – 150 KVA**
 - **Elettrodi: Rame, Ottone, Acciaio Inox, Titanio, Leghe del Rame, Berillio, Tungsteno**
 - **Tolleranze di lavorazione = da 0,0125 a 0,05 mm**
 - **Tipi di elettrolita: Cloruro di Sodio (per materiali ferrosi), Nitrato di Sodio, Acido Solforico (per materiali non ferrosi)**
 - **Costo impianto = ~400 milioni**





- Serve per diverse lavorazioni:

- Tornitura
- Punzonatura
- Fresatura
- Foratura
- Rettificazione
- Sbavatura

Fig. 7.9 - Schema di una macchina per lavorazioni elettrochimiche:

- A** = alimentatore in corrente continua
- U** = utensile
- I** = isolante
- O** = overcut
- P** = pezzo
- R** = recipiente contenitore
- L** = cappa
- F** = filtro
- V** = ventola di scarico
- M** = pompa
- E** = elettrolita
- C** = centrifuga
- S** = scarico della morchia
- K** = sistema per l'avanzamento costante dell'utensile

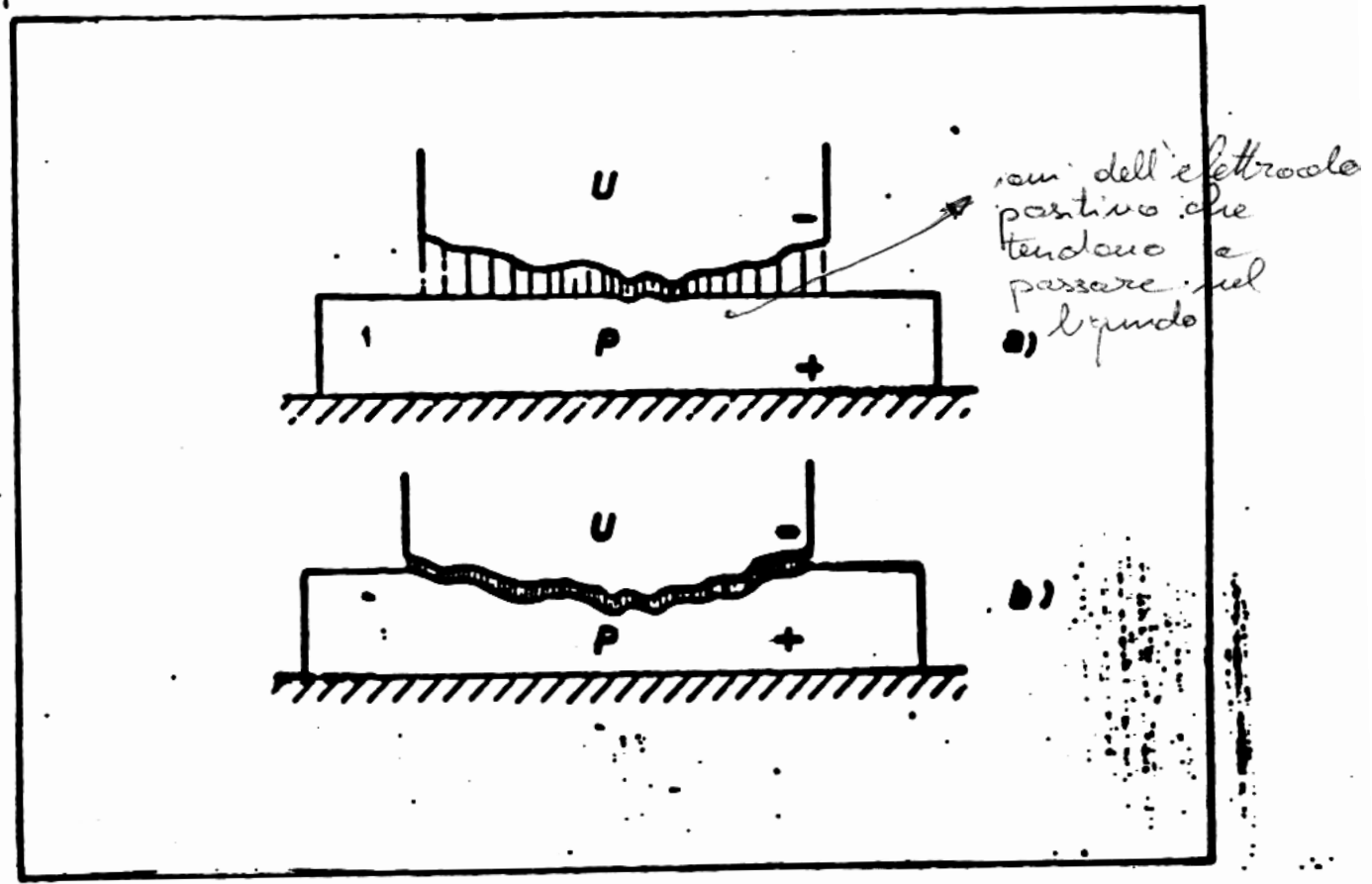


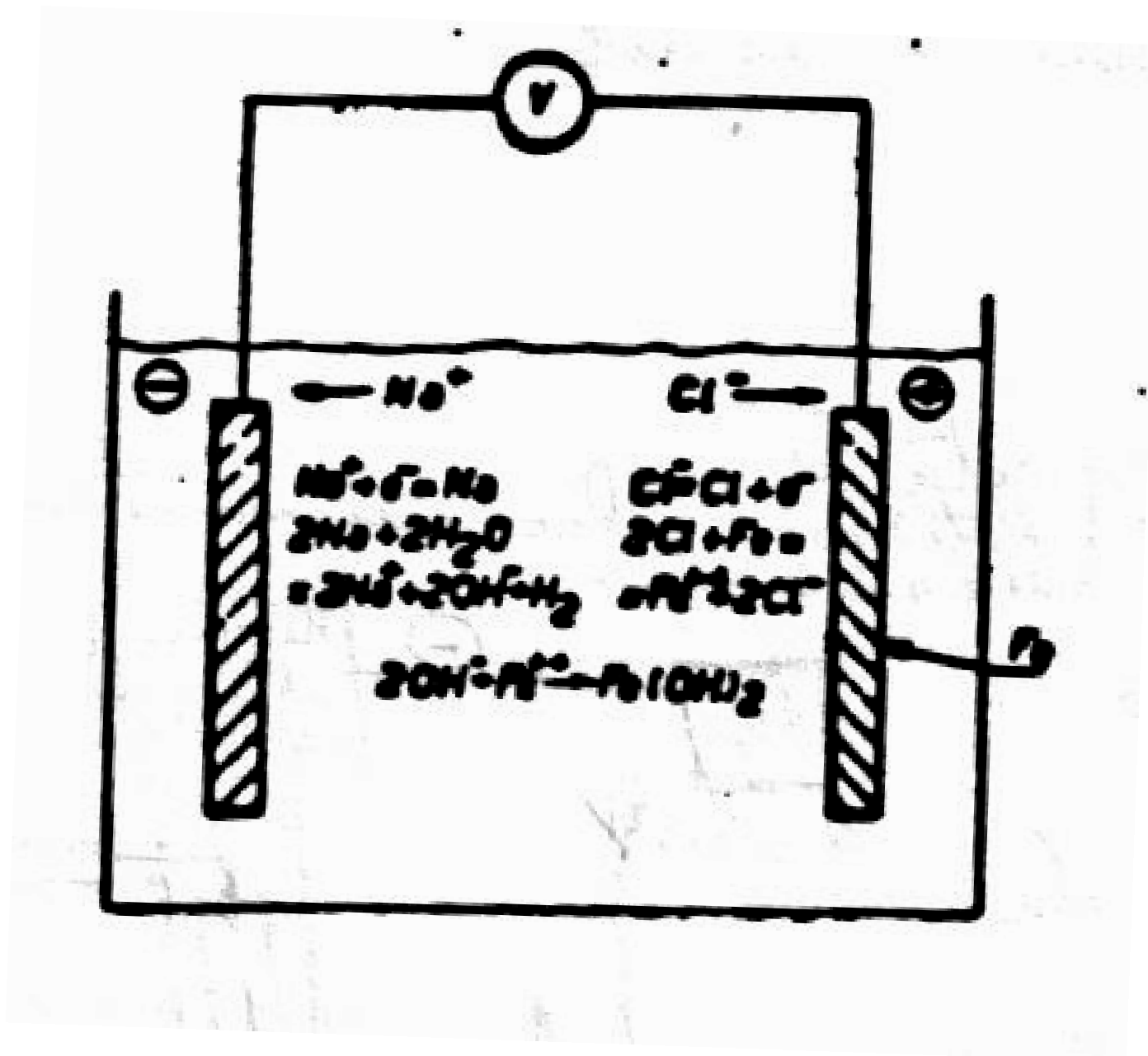
Fig. 7.8 - Lavorazione elettrochimica:
a) condizioni iniziali
b) condizioni finali
U = utensile
P = pezzo

Caratteristiche

- **Un passaggio di corrente consente il trasferimento di materiale sotto forma di ioni dall'elettrodo (+), ovvero il pezzo in lavorazione al liquido e dunque all'elettrodo (-)**
- **Il modello utensile in realtà subisce anche lui durante le operazioni un'usura intorno all'8% e di ciò occorre tener conto**
- **È una lavorazione adatta a forme di grande complessità ma non consente di ottenere una grande precisione dimensionale**
- **Il fluido presente nella zona di lavoro ha una molteplice funzione e viene filtrato e riciclato:**
 - **Funzione di raffreddamento**
 - **Evitare che scocchi una scarica tra pezzo ed utensile**
 - **Evacuare gli ioni che si separano dal pezzo**

Processo di elettrolisi

- **La soluzione presenta NaCl che sottoposto alla ddp si separa in $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$**
 - **Vengono forniti elettroni all'utensile e si liberano atomi di Na**
 - **Vengono sottratti elettroni al pezzo a liberare atomi di Cl**
 - **Tali atomi reintegrano la soluzione mentre le molecole di ferro Fe^+ che si liberano reagiscono con molecole OH^- a dare idrossido di ferro che precipita**



Applicazioni

- **Forgiati di leghe resistenti ad alte temperature**
- **Materiali di elevata durezza**
- **Palette di turbine**
- **Fori e cavità di forma complessa**

Elettroerosione

L'elettroerosione

- L'elettroerosione è una tecnologia di lavorazione ad asportazione di truciolo che utilizza le capacità erosive delle scariche elettriche. Per la particolarità del principio, questa tecnologia è in grado di lavorare solo materiali fortemente conduttori; essenzialmente i metalli
- Le macchine utensili realizzate per eseguire questo tipo di lavorazione vengono chiamate 'macchine per elettroerosione', o in inglese EDM (Electro Discharge Machining)
- Inventata casualmente dai coniugi sovietici Lazarenko nel 1943, durante esperimenti sull'usura dei contatti elettrici, l'elettroerosione è oggi una tecnologia di uso comune nell'industria, e addirittura necessaria nella produzione stampi (in particolar modo per componenti in plastica)
- Nel corso degli anni i processi si sdoppiarono tra elettroerosione a tuffo (EDM) e elettroerosione a filo (WEDM)

Caratteristiche

- **Possibilità di lavorare metalli molto duri (acciai speciali, acciai rapidi, metalli duri, ecc...), o induriti con trattamenti termici o chimici (temprati, carburati, ecc...). Infatti, la durezza del materiale da lavorare ha un'influenza secondaria per quanto riguarda la velocità d'asportazione o l'energia da utilizzare nella lavorazione.**
- **Possibilità di lavorare il pezzo creandovi qualsiasi figura geometrica o volumetrica. Ciò è dovuto alla particolarità che l'elettroerosione non necessita di un utensile rotante. È possibile ottenere spigoli netti, creare *nervature* e cavità con forme o profili impossibili da realizzare con altre tecnologie.**
- **Velocità di lavorazione lenta rispetto alle altre tecnologie ad asportazione di truciolo.**
- **Elevata usura relativa dell'utensile. Un valore tipico può essere 1-5%; cioè l'usura di 1-5 mm-cubi di utensile ogni 100 mm-cubi di materiale asportato.**
- **Le superfici lavorate presentano sempre un certo grado di rugosità (più o meno pronunciato, a seconda del grado di finitura). Questo è dovuto alla creazione di micro-crateri che sono il risultato dell'azione elettroerosiva**

Funzionamento

- L'azione di lavorazione si attua avvicinando un utensile (definito *elettrodo*) al materiale da lavorare (definito *pezzo*), il tutto in un ambiente riempito da un *dielettrico* liquido
- L'elettrodo viene alimentato con polarità positiva rispetto al pezzo, in quanto il materiale caricato negativamente subisce un'erosione superiore. Quando elettrodo e pezzo sono sufficientemente vicini, tra i due si innescano delle scariche che erodono il pezzo in modo complementare rispetto alla forma dell'elettrodo
- La scelta del materiale dell'elettrodo ed il controllo delle caratteristiche delle scariche permettono di ottenere un forte squilibrio tra l'erosione dell'elettrodo (usura dell'utensile) e erosione del pezzo (lavorazione), a favore di quest'ultimo. Man mano che il pezzo viene eroso, l'elettrodo viene fatto avanzare, fino al completamento della lavorazione
- Durante la lavorazione, l'elettrodo non entra mai in contatto con il pezzo, in quanto una cosa simile creerebbe un *cortocircuito* che impedirebbe la creazione della scintilla
- Nella lavorazione non vengono creati normali *trucioli*: i residui della lavorazione vengono chiamati sfridi e assumono l'aspetto di microscopiche palline di metallo che si disperdono nel dielettrico.

Il dielettrico

- **Pezzo ed utensile sono immersi in un fluido dielettrico quale cherosene, olio, acqua, ...**
- **La presenza di un dielettrico è fondamentale per la funzionalità della tecnologia, ed assolve vari scopi:**
 - **permette il controllo della localizzazione della scintilla**
 - **fornisce ioni per la generazione della scarica**
 - **rimuove gli sfridi di lavorazione**
 - **raffredda elettrodo e pezzo**
 - **evita le scariche elettriche**
 - **mantiene costante la resistenza elettrica**
- **Perché la tecnologia possa funzionare correttamente, è necessario il controllo delle caratteristiche delle scintille. Infatti la scarica non è generata in maniera continua, ma consiste in una successione di micro-scariche prodotte da appositi dispositivi elettronici in grado di generare treni di impulsi controllati.**

- **Il procedimento di elettro-erosione trova largo impiego nella lavorazione interna di pezzi in metallo duro, soprattutto quando si tratta di eseguire profili complicati con tolleranze ristrette. Tale è il caso della costruzione di stampi per la metallurgia delle polveri, filiere, iniettori, utensili, matrici per lo stampaggio a freddo e a caldo.**
- **Il principio su cui si basa la lavorazione per elettro-erosione può venir illustrato con una analogia meccanica.**
- **Applicando a un blocco di marmo una pressione uniformemente ripartita su una sua faccia e facendo crescere questa pressione gradatamente, si otterrà a un certo punto la frantumazione di tutto il blocco. Lavorando invece il marmo con uno scalpello e con leggeri colpi di martello, uno scultore può dare al blocco una forma complessa a piacere, senza ledere la massa interna del pezzo.**
- **Analogamente, facendo attraversare un metallo da una corrente continua di intensità crescente, si otterrà un progressivo riscaldamento del materiale e, ad un certo punto, la sua fusione. Se invece il materiale viene sottoposto a impulsi di corrente brevi e concentrati, si otterrà una distruzione localizzata del materiale: è ciò che si compie con la elettro-erosione.**
- **La generazione degli impulsi di corrente si ottiene, nel caso di impiego pratico più frequente, tramite la produzione di scariche elettriche istantanee (scintillamento) fra due elettrodi.**
- **L' elettrodo negativo (catodo) opera sul pezzo in modo che ogni scintilla asporti, come se fosse un minutissimo tagliente, un microscopico truciolo di forma sferica. L' insieme di questi tagli elementari riproduce i rilievi e gli avvallamenti dell' elettrodo operatore e genera quindi sul pezzo la forma in negativo dell' elettrodo.**

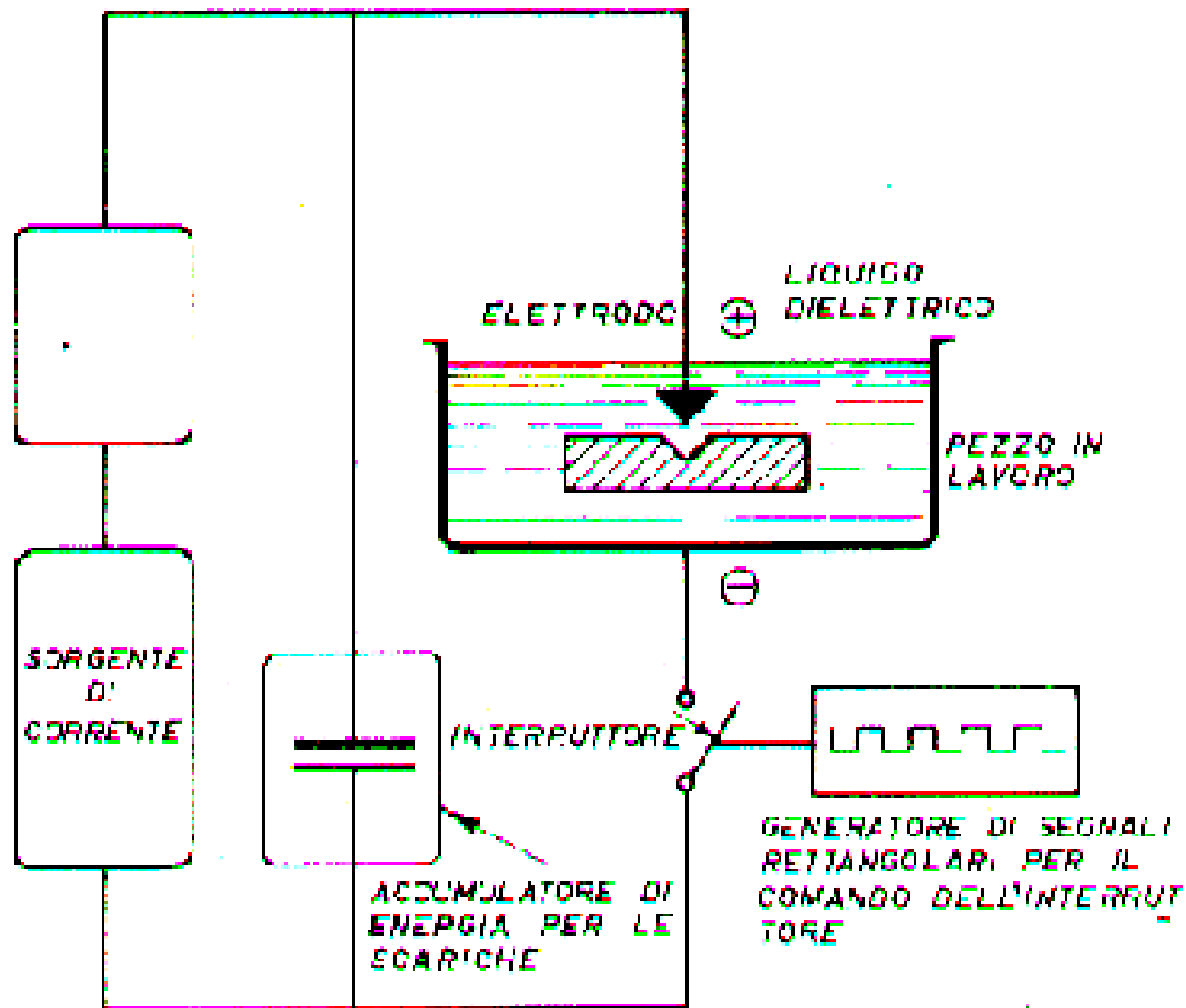


Fig. 22
Rappresentazione schematica di una macchina per elettro-erosione.

- **Il ciclo elementare di elettro-erosione è il seguente: un condensatore viene alimentato attraverso una resistenza alimentata a corrente continua; la tensione fra gli elettrodi (positivo costituito dal pezzo e negativo dall' elettrodo-utensile) aumenta fino a che si verifica la scarica che asporta il materiale. Il ciclo poi si ripete e si forma un regime stazionario che presenta analogia con l' arco elettrico, con la differenza che la densità di corrente è molto minore (la densità di corrente dell' arco elettrico è dell' ordine di grandezza di un milione di A/cm^2 mentre nell' elettro-erosione non si supera i $2800 A/cm^2$).**
- **Inoltre la densità di corrente in corrispondenza del pezzo è circa 10 volte superiore a quella in corrispondenza dell' elettrodo-utensile; di conseguenza la scarica assume una forma lievemente tronco-conica.**
- **La durata di una scarica è di circa un milionesimo di secondo; la temperatura degli elettrodi raggiunge i $4000\text{ }^\circ\text{C}$; la profondità di penetrazione è di circa 1 mm/ora.**
- **Se la scintillazione avvenisse nell' aria l' effetto erosivo sarebbe blando e disordinato. Per ottenere una fortissima concentrazione delle scariche, evitando dannose ramificazioni nelle scintille, occorre immergere gli elettrodi in un mezzo dielettrico liquido.**
- **La concentrazione delle scariche è allora così intensa da produrre un cratere sugli elettrodi (uno dei quali è costituito dal pezzo).**
- **Si usa petrolio lampante oppure olio da trasformatori.**

Fasi dell'azione

1. **Applicazione tra elettrodo e pezzo di una forte tensione. In questa fase si crea un forte campo elettrico tra i due punti a minor distanza relativa (a minor distanza elettrodo/pezzo)**
2. **Rottura del dielettrico e apertura di un canale di scarica. In questa fase il forte campo elettrico accelera alcuni elettroni del pezzo che attraversano il dielettrico, questo genera un *effetto valanga* che rompe l'isolamento del dielettrico proprio in corrispondenza del punto dove il campo elettrico è più elevato. Si crea così un canale a bassa resistenza dove la corrente elettrica può passare**
3. **Allargamento del canale di scarica e fusione del materiale. L'urto degli elettroni accelerati con le molecole di dielettrico, generano ulteriori elettroni liberi e ioni positivi che fungono da portatori di carica e vengono accelerati dal campo elettrico; conseguentemente si crea un canale di plasma ad altissima temperatura (migliaia di gradi) in grado di condurre molta corrente elettrica. Con il persistere della corrente di scarica, il canale tende ad allargarsi intorno al punto iniziale. Le aree dell'elettrodo e del pezzo a diretto contatto con il canale di plasma, sottoposte al bombardamento dei portatori di carica e alle alte temperature del canale, si fondono, creando dei piccoli crateri di materiale fuso**
4. **Interruzione della scarica e implosione del canale di scarica. Interrompendo la corrente, il canale di plasma, non più alimentato da fonti di energia esterne, implode**
5. **Espulsione del materiale dal cratere. Venendo improvvisamente a mancare la pressione sulla superficie del cratere, il materiale fuso viene risucchiato fuori, lasciando il cratere vuoto. Il materiale fuoriuscito si raffredda, solidificandosi in minuscole palline (sfridi)**

Tipi di elettroerosione

- **elettroerosione a tuffo; in questa applicazione la lavorazione ha come scopo principale lavorare il pezzo facendogli assumere una forma complementare rispetto all'elettrodo**
 - **Il ciclo di lavorazione è diviso in due fasi:**
 1. **creazione di un elettrodo di forma 'negativa' rispetto alla forma della lavorazione che si vuole ottenere;**
 2. **elettroerosione del pezzo con l'elettrodo precedentemente creato, ottenendo così in 'positivo' la forma voluta**
- **elettroerosione a filo; in questa applicazione un filo conduttore teso è usato come elettrodo per tagliare o profilare il pezzo da lavorare**
 - **Il filo (immagazzinato in una bobina) viene cambiato di continuo durante la lavorazione, in quanto, essendo sottoposto all'usura delle scariche e allo stress di dilatazione, finirebbe per spezzarsi spesso, interrompendo la lavorazione.**

Tipi di elettroerosione

- **foratura per elettroerosione; in questa applicazione un tubo viene usato come elettrodo per forare il pezzo**
 - **Vengono usati tubi (generalmente di piccolo diametro) in quanto attraverso essi viene pompato del dielettrico, necessario per asportare gli sfridi dal fondo della foratura**
- **molatura per elettroerosione; in questa applicazione una mola di materiale conduttore erode il pezzo, in modo analogo ad una mola ad abrasione**
 - **Un esempio d'uso di questa tipologia di tecnica, è quello dell'affilatura di lame con denti di Vidia o diamante sinterizzato, materiali di cui è difficoltosa (e costosa) la molatura con tecniche abrasive tradizionali.**

Parametri

- **I principali parametri elettrici controllati sono:**
 - **tensione d'innescio; tipicamente alcune centinaia di volt**
 - **polarità; normalmente elettrodo positivo e pezzo negativo**
 - **corrente massima della scintilla; compresa tra 1 e 500 ampere**
 - **durata della scintilla; compresa tra 1 micro-secondo e 2 milli-secondi**
 - **pausa tra una scintilla e la successiva, compresa tra 1 e 30 micro-secondi**
- **L'elettroerosione lavora sulla capacità termomeccanica delle scariche elettriche di erodere i materiali.**

Caratteristiche

- **Componenti della macchina:**
 - **Generatore di corrente**
 - **Elettrodo-utensile a movimento assiale**
 - **Sistema di circolazione e filtraggio del fluido**

- **Abbinamenti utensile-pezzo**
 - **Ottone ⇒ ottone/acciaio**
 - **Rame ⇒ acciaio/grafite**
 - **Grafite ⇒ grafite/rame/acciaio/alluminio**
 - **Acciaio ⇒ acciaio**
 - **Rame-tungsteno ⇒ rame/grafite/acciaio**

Proprietà

- **La velocità di asportazione è proporzionale sia all'energia di ogni impulso che alla frequenza di impulsi**
- **La finitura dipende dall'energia fornita, dalla frequenza degli impulsi, dalla forma del pezzo**
- **Sul pezzo finito rimane un sottile strato di materiale fuso e ri-solidificato, non lascia comunque bave**

Vantaggi/Svantaggi

- **Tranciatura chimica:**

- **Vantaggi**

- Nessuna distorsione anche su prodotti difficili quali lamierini sottili
- Nessuna bava
- Lavorazioni di materiali duri e fragili
- Bassi costi di impianto e di modifica

- **Svantaggi**

- Necessità di operatori qualificati
- Vapori corrosivi delle soluzioni
- Piccoli spessori asportabili

- **Fresatura chimica:**

- **Vantaggi**

- Asportazione uniforme
- Operatori anche non qualificati
- Buone finiture e tolleranze
- Bassi costi

- **Svantaggi**

- Solo alluminio e sue leghe
- Profondità di asportazione limitata
- Evacuazione gas
- Maschere costose

Lavorazioni ad ultrasuoni

- **Gli ultrasuoni sono delle onde meccaniche sonore. A differenza dei fenomeni acustici propriamente detti le frequenze che caratterizzano gli ultrasuoni sono superiori a quelle mediamente udibili da un orecchio umano. La frequenza convenzionalmente utilizzata per discriminare onde sonore da onde ultrasoniche è fissata in 20 kHz. Lo stesso termine *ultrasuono* chiaramente indica *ciò che è al di là (ultra)* del suono, identificando con suono solo il fenomeno fisico udibile.**
- **Come ogni altro tipo di fenomeno ondulatorio gli ultrasuoni sono soggetti a fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione e possono essere definiti mediante parametri quali la frequenza, la lunghezza d'onda, la velocità di propagazione, l'intensità (misurata in decibel), l'attenuazione (dovuta all'impedenza acustica del mezzo attraversato)...**
- **Nonostante, come detto, l'essere umano, non sia in grado di udire gli ultrasuoni, altri animali hanno tale capacità. Ad esempio i cani (per i quali sono in commercio appositi fischietti di richiamo agli ultrasuoni), i delfini e le balene che li usano per comunicare tra loro e i pipistrelli che li usano per vedere gli ostacoli mentre volano di notte.**
- **Gli ultrasuoni trovano utilizzo per lo più in campo medico ed industriale essendo ampiamente utilizzati nelle ecografie, nei controlli non distruttivi e in molti apparecchi utilizzati per la pulizia superficiale di oggetti di piccole dimensioni.**
- **Anche il sonar impiega intervalli di frequenze che non di rado sconfinano nella gamma degli ultrasuoni.**

Saldatura ad ultrasuoni

- **La saldatura ad ultrasuoni è una tipologia di saldatura in cui si utilizzano gli ultrasuoni, cioè una vibrazione a frequenze sonore superiori rispetto a quelle percettibili dall'orecchio umano, per saldare in genere materiali plastici, ma in certi casi anche metalli.**
- **Per effettuare una saldatura a ultrasuoni si utilizzano i “sonotrodi”, degli utensili che generano una vibrazione ad una particolare frequenza.**
- **Le parti da saldare sono sistemate e messe in pressione dal sonotrodo opportunamente conformato secondo la geometria del pezzo. La saldatrice ad ultrasuoni comincia ad emettere delle onde sonore fra i 20kHz e i 40kHz (a seconda del tipo di macchina) che producono una vibrazione fra i materiali i quali fondono e si saldano.**

- **Questo tipo di saldatura è l'ideale per parti molto piccole, come succede ad esempio nel campo elettrico, elettronico, tecnico ecc. La saldatura a ultrasuoni consente un'ottima precisione e di lavorare su parti minute senza danneggiarle, anzi ottenendo un risultato ineccepibile. In alcuni casi le saldatrici ad ultrasuoni sono adeguate anche nel caso di saldature di medio taglio, come per esempio nel settore automobilistico per saldare la fanaleria o altre parti simili.**
- **Esiste poi un'evoluzione particolare della saldatura ad ultrasuoni: le pistole per saldature ad ultrasuoni. Le pistole saldatrici ad ultrasuoni sono dei macchinari portatili collegati ad un cavo della corrente elettrica che consentono di fare punti di saldatura in zone difficilmente raggiungibili con una saldatrice di grosse dimensioni.**
- **La particolarità di questo strumento è che non necessita di alcun accorgimento, è sufficiente acquistare la pistola ed i sonotrodi necessari e si è subito pronti a saldare. Può essere quindi ideale l'utilizzo della pistola per saldatura ad ultrasuoni in catene di montaggio o di assemblaggio. Questo sistema è molto utilizzato nel settore dell'elettronica, dell'imballaggio e in alcuni casi dell'edilizia.**

- **Gli ultrasuoni sono generati da trasduttori magnetostrittori, il fenomeno della magnetostrizione consiste nella variazione di lunghezza, che un materiale subisce quando viene investito da un campo magnetico, questa variazione è sull'ordine di 10^{-6} mm.**
- **Il magnetostrittore è formato da un pacco di lamierini dello spessore di 0,1-0,3mm (generalmente di nichel) annegati in bachelite, da un avvolgimento di magnetizzazione, da un magnete permanente e dalla superficie che emette gli ultrasuoni. La corrente che alimenta gli avvolgimenti deve avere la frequenza uguale a quella naturale del pacco di lamierini, per cui si ottiene una condizione di risonanza,**
- **Nel trapano ad ultrasuoni le vibrazioni vengono trasmesse dal pacco di lamierini all'amplificatore, che può avere una forma bicilindrica(l'amplificazione è il rapporto tra le superfici dei due cilindri) o cilindrica con generatrice iperbolica(l'amplificazione è il rapporto tra i due diametri), che le trasmette alla testina dell'utensile. L'utensile trasmette le sue vibrazioni alle particelle abrasive, presenti nel liquido in cui avviene la lavorazione, queste particelle agiscono, asportando materiale, sul pezzo, contro il quale sono lanciate e premute.**

- **Il processo permette di lavorare materiali molto duri come acciai temprati, vetro ecc. La velocità di esecuzione non dipende dalla forma della lavorazione ma dal volume di materiale da asportare.**
- **L'apparecchiatura per la saldatura ad ultrasuoni è simile al trapano, solamente al posto dell'utensile c'è il sonotrodo che è l'organo, che materialmente compie il lavoro di saldatura. Con questo procedimento si possono unire materiali diversi fra loro o difficilmente saldabili, come titanio, tantalio, zirconio ecc e di spessori sottili 0,005mm fino a qualche millimetro. Il maggior vantaggio è che non si ha dissipazione di calore su altre parti del pezzo e di conseguenza non si hanno deformazioni. Altre applicazioni degli ultrasuoni sono: la rivettatura di rivetti plastici in lastre di metallo e la pulitura che sfrutta la turbolenza prodotta dagli ultrasuoni, in un liquido, contenuto in una vasca.**