

Questo articolo ha l'obiettivo di ripercorrere l'evoluzione che il getto d'acqua standard ha avuto verso il **microAWJ** presso il **WJ_Lab** del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano

■ Massimiliano Annoni

L'articolo open access (1) contiene una sezione dedicata alla modellazione del processo che spiega nel dettaglio i collegamenti logici tra le diverse ricerche sugli orifizi; qui è però utile tracciare la linea che conduce direttamente all'applicazione microAWJ



Microlavorazioni con taglio a getto d'acqua

L'evoluzione del taglio a getto d'acqua verso applicazioni ad elevata precisione (microAWJ, micro abrasive waterjet) è stata documentata solo parzialmente in lavori scientifici e pubblicazioni tecniche poiché alcuni sviluppi della tecnologia sono stati mantenuti riservati per il loro sfruttamento industriale. Questo articolo ha l'obiettivo di ripercorrere l'evoluzione che il getto d'acqua standard ha avuto verso il microAWJ presso il WJ_Lab del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano attraverso i documenti esistenti e di aggiungere alcune informazioni di contesto utili a chi sia interessato a generare valore attraverso la ricerca scientifica nel campo della manifattura.



Cortesia di WatAJet s.r.l., Besnate (VA), Italia

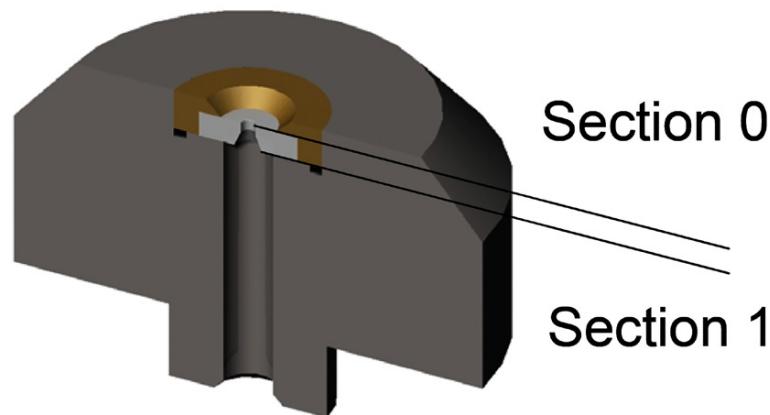


Figura 1. Tipico orifizio (o ugello primario) per il taglio waterjet. In grigio chiaro, il vero e proprio orifizio (zaffiro sintetico o diamante). In grigio scuro, la montatura in acciaio inossidabile. Il terzo componente in figura è l'interfaccia in ottone. Section 0: ingresso. Section 1: uscita

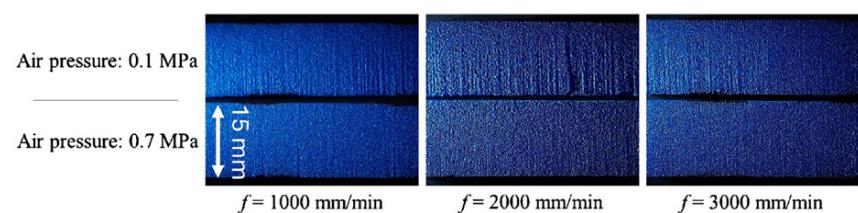


Figura 2. Taglio a getto d'acqua pura assistito da aria. Materiale: Evazote® (Zotefoams plc, Croydon, UK). f: velocità di avanzamento; pressione dell'acqua: 200 MPa; diametro dell'orifizio: 0,08 mm. Una pressione dell'aria più elevata all'ingresso laterale dell'orifizio produce una portata d'aria più elevata all'interno dell'ugello, in grado di disturbare il getto aumentandone la capacità di taglio su questo materiale

Stabilità nel tempo e nello spazio: lo studio sugli ugelli

Il tema che ha aperto la strada al microAWJ presso il WJ_Lab è stato lo studio dettagliato del ruolo della geometria dell'orifizio (o ugello primario) sulla stabilità del getto nel tempo e nello spazio. L'articolo open access (1) contiene una sezione dedicata alla modellazione del processo che spiega nel dettaglio i collegamenti logici tra le diverse ricerche sugli orifizi; qui è però utile tracciare la linea che conduce direttamente all'applicazione microAWJ.

Gli studi sugli orifizi sono partiti dall'analisi dell'influenza della loro geometria interna sui coefficienti di efflusso (Figura 1) (2), fino a comprendere meglio l'importanza del fenomeno dell'hydraulic flip nella creazione di un getto stabile nello spazio (coerenza) e nel tempo (3). Questo fenomeno permette al getto d'acqua di fluire attraverso l'orifizio senza toccarne

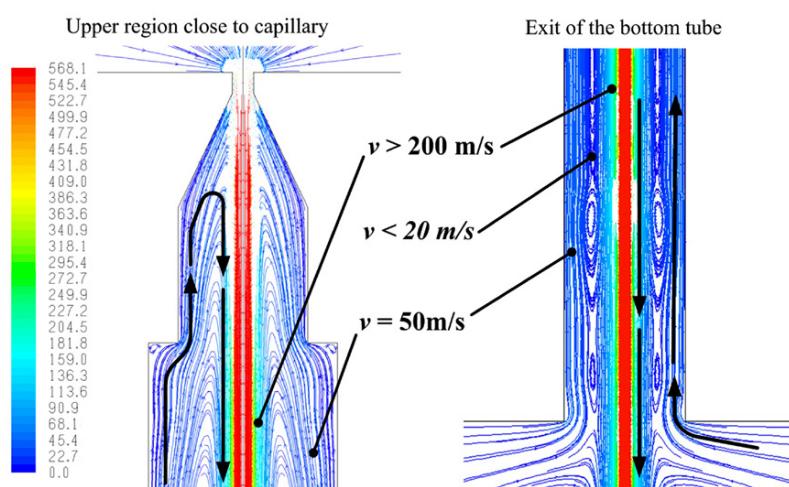


Figura 3. Linee di flusso colorate in base alla velocità (m/s). La ricircolazione dell'aria all'interno del tubo di uscita dell'orifizio è evidenziata dalle frecce nere (7)

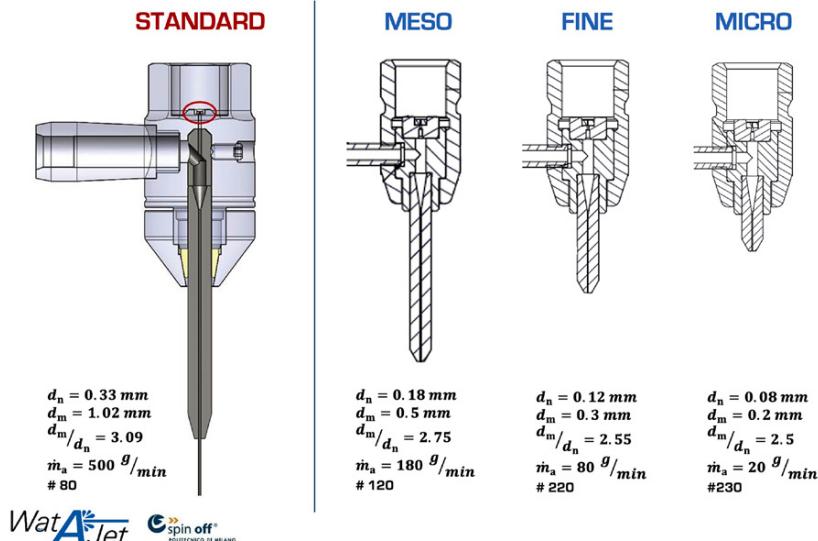


Figura 4. Configurazioni attuali delle teste di taglio a getto d'acqua, dallo standard al microAWJ (cortesia di WatAJet s.r.l., Besnate (VA), Italia). Il cerchio rosso nell'immagine indica la posizione dell'orifizio

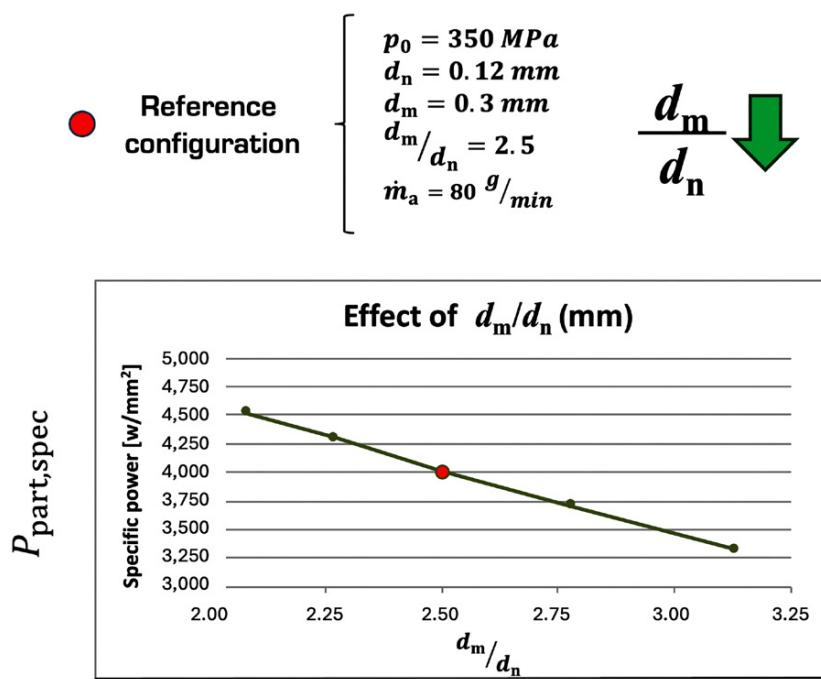


Figura 5. Potenza cinetica specifica delle particelle abrasive $P_{part,spec}$ in funzione del rapporto tra diametro del tubo di focalizzazione e diametro dell'orifizio. La freccia verde indica come questo rapporto debba essere ridotto per aumentare $P_{part,spec}$

le pareti laterali, godendo di una situazione di assenza di attrito che permette grande stabilità. Questo accade grazie al distacco della vena fluida, che avviene al bordo di ingresso dell'ugello quando è a spigolo vivo, e alla generazione della cosiddetta vena contracta, cioè il restringimento di diametro della vena fluida a valle della luce d'uscita.

Il passo successivo è stato collegare le prestazioni idrodinamiche dell'orifizio con le prestazioni di taglio (4, 5). È interessante notare come la coerenza del getto non sia sempre una caratteristica utile nel taglio a getto d'acqua. Quando si tagliano materiali morbidi, come le schiume plastiche, con getti d'acqua pura (senza abrasivo), abbiamo dimostrato che un getto più "disturbato" (meno coerente) taglia meglio, probabilmente perché la superficie irregolare del getto si comporta come i denti di un utensile di brociatura (6) (Figura 2).

Intorno al 2010 è diventato chiaro come la fluidodinamica computazionale (CFD) potesse fornire una comprensione più approfondita del comportamento e delle prestazioni del getto. Dopo aver studiato la cavitazione del getto e l'innesto dell'hydraulic flip, lo studio riportato in (7) ha analizzato la situazione particolare che si verifica quando alcune gocce restano intrappolate nell'orifizio, una volta spento il getto, a causa della capillarità.

Alla successiva apertura del getto, alcune piccole gocce possono essere trascinate verso l'alto, spinte lungo le pareti interne del tubo dell'orifizio dall'aria in ingresso risucchiata dal getto. Infatti, il getto trascina via l'aria a contatto con la sua superficie all'uscita dall'orifizio, ma allo stesso tempo genera una ricircolazione che spinge dell'aria verso l'alto lungo le pareti dell'orifizio (Figura 3). Queste gocce, risalendo, possono temporaneamente ostruire lo zaffiro, causando instabilità.

Per risolvere il problema, il WJ_Lab ha proposto una nuova configurazione di orifizio dotata di un foro di ingresso laterale: una sorta di barriera che protegge la zona capillare dell'orifizio e, allo stesso tempo, regola intenzionalmente la coerenza del getto (6). Questa maggiore capacità di controllare la forma (taper) e la stabilità del getto, nota come "air-assisted pure water jet cutting system", rappresenta uno strumento importante per il taglio a getto d'acqua ad alta precisione (8) (Figura 2).

Sviluppo di una testa di taglio di precisione

Alcuni lavori di tesi si sono concentrati sulla miniaturizzazione della testa di taglio. Sebbene non siano stati pubblicati articoli scientifici del WJ_Lab su questo tema, si può sottolineare che, per i test sperimentali, fu richiesta l'opera di alcuni fornitori selezionati per la realizzazione di orifizi con diametro di 50 μm e tubi di focalizzazione (detti anche focalizzatori) da 200 μm e anche meno.

Inizialmente, ci si è affidati a componenti di alta gamma disponibili in commercio, ma successivamente fu necessario ricorrere a orifizi in diamante e focalizzatori dal diametro estremamente ridotto, fino a 130 μm .

È interessante sottolineare come il rapporto tra il diametro del tubo di focalizzazione e quello dell'orifizio sia diverso dalla "regola aurea" del taglio a getto d'acqua, secondo la quale dovrebbe essere pari a 3.

Nei sistemi di taglio ad alta precisione attuali, infatti, esistono teste di taglio diverse (Figura 4) a seconda delle dimensioni del getto e del livello di accuratezza richiesto sul pezzo. Nel caso del microAWJ, il rapporto appena citato risulta più piccolo (2,5).

La spiegazione di questo fenomeno si trova nel grafico della Figura 5, che rappresenta la potenza cinetica delle particelle abrasive specifica sull'area interna del focalizzatore ($P_{part,spec}$) in funzione del rapporto d_m/d_n (diametro interno del focalizzatore/diametro interno dell'orifizio). $P_{part,spec}$ aumenta al diminuire di questo rapporto, poiché il tubo di focalizzazione riesce a concentrare meglio la potenza cinetica delle particelle abrasive su un'area ridotta. Poiché le portate in gioco nelle scale micro sono molto basse (fino a 5 g/min), questa riduzione relativa del diametro del tubo di focalizzazione risulta praticabile ed efficace sulle prestazioni di taglio.

Prestazioni del taglio microAWJ

Le conoscenze tecniche erano ormai consolidate per tentare di sfruttarle in ambito industriale, così il team del WJ_Lab (Massimiliano Annoni, Francesco Arleo, Luca Villa e Stefano Volpi) decise di fondare WatAJet s.r.l. (Besnate (VA), Italia, www.watajet.com).

Negli anni successivi sono stati condotti ulteriori studi per migliorare le prestazioni dei dosato-

MicroAWJ Process Parameters' Ranges

Water pressure (MPa), p	80-380
Water flow rate (L/min), Q_w	0.3-0.8
Orifice diameter (mm), d_n	0.05-0.10
Focusing tube diameter (mm), d_m	0.20-0.30
Focusing tube length (mm), l_m	20-30 (100.dm)
Abrasive type	Garnet, Olivine, Alumina
Abrasive size (mesh# (μm))	#200 (74) - #350 (44)
Abrasive mass flow rate (g/min)	
m_a	10-80
Machining area	Up to 800 x 800 mm ²

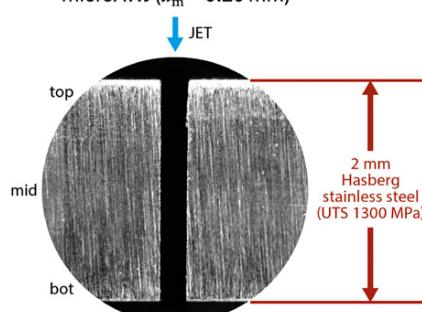
Typical Process Parameters (f: Feed Rate)

$p =$	380 MPa
$d_n =$	0.10 mm
$d_m =$	0.30 mm
Abrasive size =	#220 (Garnet)
$m_a =$	70 g/min
Workpiece thickness:	1 mm
Fe alloys: $f =$	200 mm/min
Al alloys: $f =$	600 mm/min
Ti alloys: $f =$	260 mm/min
Carbon fibre: $f =$	800 mm/min

Tabella 1. Range dei parametri di processo del microAWJ (sinistra). Parametri di processo tipicamente utilizzati nel microAWJ e esempi di velocità di avanzamento (destra) (9) (cortesia di WatAJet s.r.l., Besnate (VA), Italia)

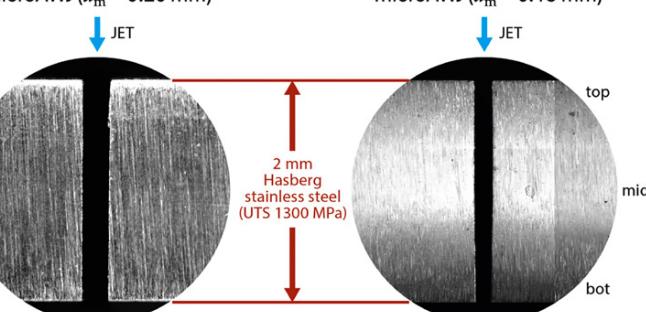
STATE OF THE ART

microAWJ ($d_m = 0.20 \text{ mm}$)



INNOVATION

microAWJ ($d_m = 0.13 \text{ mm}$)



0.08	PRIMARY ORIFICE DIAMETER [mm]	0.05
0.20	FOCUSING TUBE DIAMETER [mm]	0.13
350	WATER PRESSURE [MPa]	350
Garnet (Barton)	ABRASIVE TYPE	Garnet (Barton)
230	ABRASIVE SIZE (# mesh)	W0 (~600)
17	ABRASIVE MASS FLOW RATE (g/min)	3
27	FEED RATE (mm/min)	6
0.35	STAND OFF DISTANCE [mm]	0.20
0.2452	KERF WIDTH [mm]	0.1592
-0.0011	KERF TAPER [mm]	0.0072
top 1.10 mid 1.25 bot 1.38	Ra ROUGHNESS [μm]	top 0.37 mid 0.51 bot 0.65
top 8.77 mid 8.80 bot 9.87	Rz ROUGHNESS [μm]	top 3.17 mid 3.83 bot 4.62

Figura 6. Confronto tra le migliori prestazioni attuali sul mercato microAWJ (sinistra) e il taglio microAWJ più accurato realizzato presso il WJ_Lab in collaborazione con WatAJet s.r.l. (9)

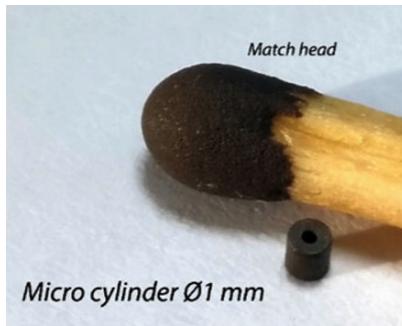


Figura 7. Metallo sinterizzato (acciaio magnetico), spessore = 1 mm, pressione dell'acqua = 340 MPa, abrasivo = Garnet #230, tolleranza del diametro del foro = $\pm 0,006$ mm (cortesia di WatAJet s.r.l., Besnate (VA), Italia)



Cortesia di WatAJet s.r.l., Besnate (VA), Italia

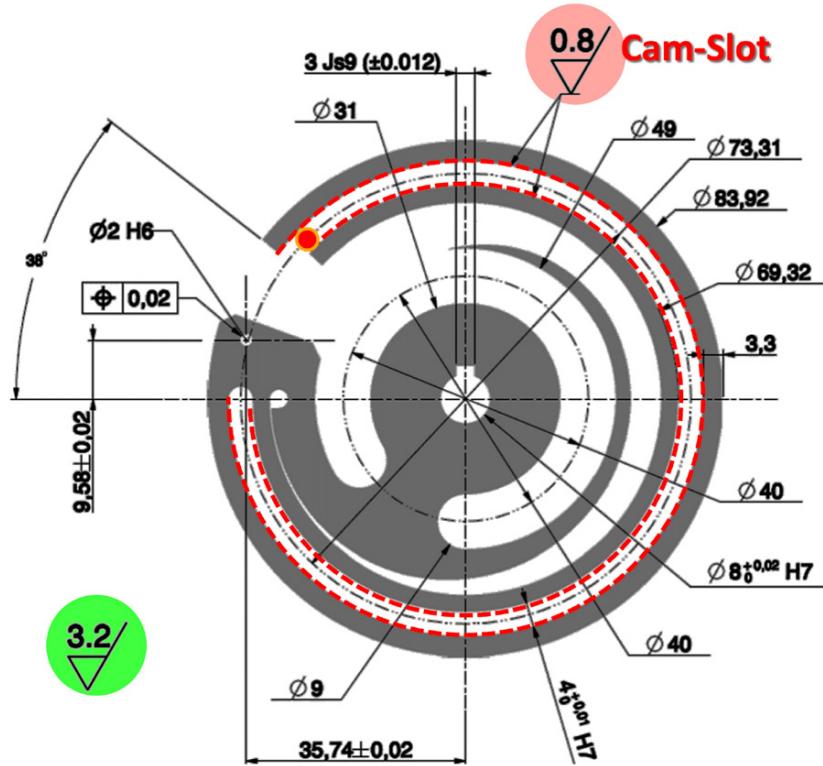
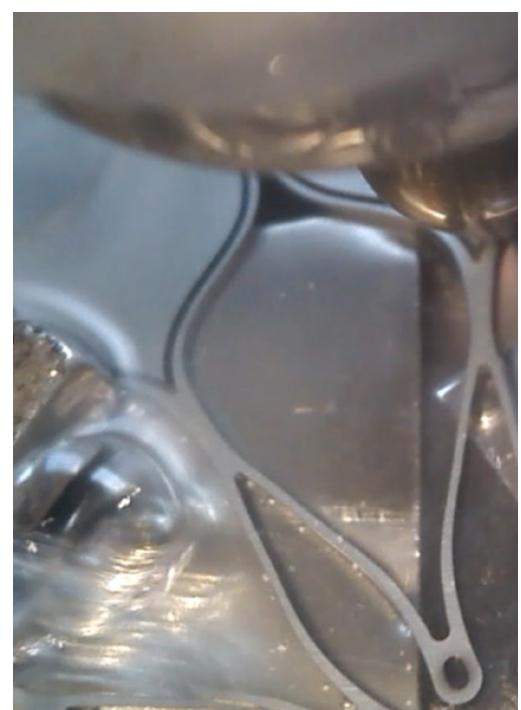


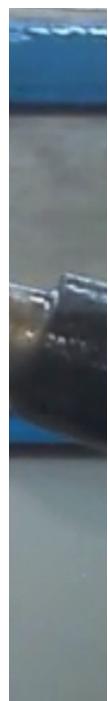
Figura 8. Molla a rigidezza variabile lavorata in (11)



ri di abrasivo fine, come descritto in (1). L'uso di dosatori specifici ha permesso di ottenere il nostro taglio più accurato e più sottile, con una larghezza del solco inferiore a 160 μ m (Figura 6).

Parametri di lavorazione ed esempi

Una buona panoramica sulla tecnologia microAWJ è stata pubblicata in (10). Questo capi-



**Intorno al 2010
è diventato
chiaro come la
fluidodinamica
computazionale
(CFD) potesse fornire
una comprensione
più approfondita del
comportamento e
delle prestazioni del
getto**



Cortesia di WatAJet s.r.l., Besnate (VA), Italia

tolo di libro discute innanzitutto le principali caratteristiche delle apparecchiature a getto d'acqua e i parametri di processo che influenzano il risultato finale (Tabella 1), quindi presenta un'analisi approfondita della tecnologia microAWJ, accompagnata da alcuni casi studio per mostrare il potenziale della tecnologia attraverso le

sue prestazioni effettive (Figura 7). Un altro articolo rilevante per il tema del microAWJ si intitola "Lavorazioni di tornitura-fresatura e waterjet a elevata precisione" ed è stato pubblicato su Macchine Utensili di gennaio 2024.

Il waterjet può essere considerato oggi tra i processi di lavorazione ad alta precisione, in quanto è in grado di raggiungere tolleranze dimensionali inferiori a 10 µm sul pezzo lavorato. Inoltre, può essere integrato in catene di processo che coinvolgono altri processi di microlavorazione. La capacità di produrre componenti estremamente accurati con caratteristiche su scala microscopica può essere ulteriormente potenziata dalla combinazione di diversi processi in un singolo ciclo di lavorazione. Il lavoro (11) esplora una catena di processo efficace che combina le tecnologie microAWJ e microWEDM (microelettrorossione a filo).

Come caso di prova principale è stato scelto il componente rappresentato nella Figura 8, che richiede la lavorazione di feature geometriche complesse e una bassa rugosità sulle pareti

del taglio. I vantaggi derivanti dalla combinazione delle due tecnologie vengono discussi in termini di tempo di lavorazione, rugosità superficiale e accuratezza delle feature.

La sperimentazione ha mostrato che il microAWJ è molto rapido rispetto al microWEDM e può ottenere una buona qualità superficiale (R_a intorno a 1 µm) e una bassa inclinazione delle pareti. Tuttavia, la rugosità peggiora leggermente lungo lo spessore della lastra. Al contrario, i test sul microWEDM hanno evidenziato che questo processo raggiunge una rugosità superficiale più fine (R_a inferiore a 0,5 µm) senza inclinazione delle pareti, ma con un tempo di lavorazione considerevole (un centinaio di volte superiore rispetto al microAWJ).

Per entrambi i casi di prova, la combinazione dei due processi consente di soddisfare i requisiti di qualità superficiale e precisione geometrica. Tuttavia, le catene di processo concepite richiedono un tempo di lavorazione significativo, attualmente sostenibile solo per parti di piccole dimensioni. ■

Riferimenti bibliografici

1. Annoni, M. A Review of Waterjet Cutting Research towards microAWJ and the Definition of the Waterjet Digital Twin. *Materials* 2024, 17, 1328. <https://doi.org/10.3390/ma17061328>
2. Annoni, M.; Monno, M. Effects of diamond orifice geometry on water jet cutting performance. In Proceedings of the 18th International Conference on Water Jetting, Gdansk, Poland, 13–15 September 2006; p. 293.
3. Coray, P.S.; Jurisevic, B.; Junkar, M.; Heiniger, K.C. Measurements on 5:1 Scale Abrasive Water Jet Cutting Head Models. 2012.
4. Hashish, M. Abrasive-waterjet (AWJ) studies. In Proceedings of the BHR Group 2002 Water Jetting, Aix-En-Provence, France, 16–18 October 2002.
5. Annoni, M.; Monno, M. Effect of water jet orifice geometry on jet behaviour and cutting capability. *Key Eng. Mater.* 2007, 344, 177–184.
6. Annoni, M.; Arleo, F.; Malmassari, C. CFD aided design and experimental validation of an innovative Air Assisted Pure Water Jet cutting system. *J. Mater. Process. Technol.* 2014, 214, 1647–1657.
7. Arleo, F.; Annoni, M.; Basha, A.T.; Etxeberria, I.; Gonzalez, A.S. Numerical simulation of a pure water jet inside an orifice: Jet stability and effect of droplets collisions. In Proceedings of the BHR Group—20th International Conference on Water Jetting, Graz, Austria, 20–22 October 2010; p. 301.
8. Arleo, F. Air-Assisted Water Jet Cutting Technology. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 2014.
9. Viganò, F. Micro Abrasive Water Jet System for Ultrafine Cutting. Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 2018.
10. Annoni, M.; Arleo, F.; Viganò, F. Micro-waterjet Technology. In Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications; Part of the Springer Tracts in Mechanical Engineering Book Series (STME); Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; pp. 129–148.
11. Modica, F.; Basile, V.; Viganò, F.; Arleo, F.; Annoni, M.; Fassi, I. Micro-Abrasive Water Jet and Micro-WEDM Process Chain Assessment for Fabricating Microcomponents. *J. Micro Nano-Manuf.* 2019, 7, 1.