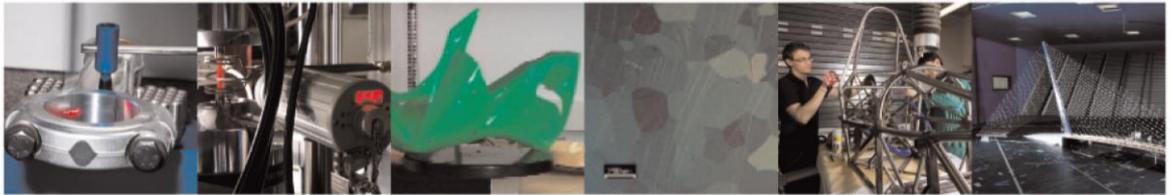




POLITECNICO
MILANO 1863

DIPARTIMENTO DI MECCANICA



Diamond coating CVD to enable micro drilling of sintered hard metal

Annoni, M; Parenti, P; Swiathy, G

This is a post-peer-review, pre-copyedit version of an article published in LA METALLURGIA ITALIANA.

This content is provided under [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) license



Rivestimento diamantato CVD per abilitare la microforatura di metallo duro allo stato sinterizzato

CVD diamond coating for enabling direct microdrilling of cemented hard metals

P. Parenti, M. Annoni - Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Milano
G. Swiathy, G.P. De Gaudenzi - F.I.L.M.S. S.p.A. OMCD Group, Anzola d'Ossola (VB)

A causa delle loro elevate proprietà meccaniche, durezza e resistenza all'usura, lavorare i carburi metallici allo stato sinterizzato è una sfida che poche tecnologie come l'elettroerosione (EDM) e la rettifica con utensili diamantati/CBN (nitruro di boro cubico), estremamente onerose dal punto di vista dei costi e produttività, riescono ad affrontare. Solo recentemente, il settore delle post-lavorazioni di metallo duro cementato si è ampliato grazie agli sviluppi della tecnologia di rivestimento diamantato CVD (Chemical Vapor Deposition), applicata ad utensili integrali in metallo duro di piccole dimensioni (frese e utensili da foratura elicoidali). Lo scopo di questo lavoro investigativo è indagare il potenziale della foratura per asportazione di truciolo mediante utensili da 1.6 mm di diametro su carburo di tungsteno cementato a matrice di cobalto WC/Co (10%wt) con una durezza di 1550 HV. Si è dimostrato che tale tecnologia è capace di garantire rapidità d'esecuzione (tasso di rimozione complessivo del materiale ~ 0.21 mm³/min), fino a 20 volte superiore all'elettroerosione, e ottima finitura superficiale (Ra<0.2 µm). Ciò conferma che la tecnologia può ricoprire un importante ruolo in filiere produttive esistenti così come in soluzioni di prototipazione avanzate.

Parole chiave: metallo duro, carburo di tungsteno, cobalto, microforatura, utensili rivestiti in diamante CVD

The high mechanical resistance, high hardness and wear resistance of carbides prevent their easy machinability at the sintered state and only few manufacturing technologies, such as EDM or grinding with diamond/CBN wheels, can be successfully adopted. Recently, the CVD diamond coating technology applied to milling and drilling tools with small dimensions, have widened the post-process machining scenario. In this study, 1.6 mm diameter drilling tools with CVD diamond coating are adopted to machine tungsten carbide (with cobalt bonding WC/Co 10%wt) at 1550 HV to test the real potential of this manufacturing solution. The technology demonstrated to obtain high removal rates (overall material removal rate ~0.21 mm³/min), up to 20 times higher than EDM, with good surface quality (Ra<0.2 µm). The results of this study confirm that direct cutting of cemented hard metals with CVD diamond coated tools can be an effective manufacturing solution, eligible for integration in existing process chains and for enabling advanced prototyping.

Keywords: Hardmetal, tungsten carbide, cobalt, microdrilling, cvd diamond coated tools

INTRODUZIONE

I limiti di accuratezza e ripetibilità dei processi di produzione per metallurgia delle polveri richiede che la gran parte dei manufatti in carburi metallici, subisca operazioni di finitura o post-processing, dopo il processo di sinterizzazione [1]. Tali operazioni, servono non solo per dotare i componenti della forma e qualità superficiale richiesti ma anche per realizzare features geometriche complicate, ad esempio fori ad elevato rapporto di forma, come richiesto in molteplici applicazioni industriali [2]. Per la lavorazione dal pieno del carburo di tungsteno sinterizzato si ricorre principalmente all'e lavorazioni di elettroerosione a tuffo e a filo (Electrical Discharge Machining – EDM), garantendo le migliori finiture superficiali e accuratezze geometriche a fronte di basse produttività e potenziali alterazioni chimiche degli strati superficiali delle

superfici lavorate [3-4]. Le lavorazioni per asportazione di truciolo sono invece principalmente impiegate per la finitura delle superfici con operazioni di rettifica mediante mole diamantate o cBN (Cubic Boron Nitride), ma anche in questo caso produttività, problemi termici e integrità superficiale rappresentano importanti limiti tecnologici [5]. Dal punto di vista delle lavorazioni per asportazione di truciolo dei carburi metallici sinterizzati mediante utensili “a tagliente definito” (tornitura, fresatura o foratura etc.), il problema principale è conferire agli utensili opportuna resistenza all'usura abrasiva per mantenere inalterata la micro-geometria di taglio in modo da garantire stabilità nelle lavorazioni [6]. Nel corso degli ultimi decenni, tecnologie basate su utensili in diamante mono o policristallino (SCD/PCD/NPCD) e cBN hanno dimostrato la loro capacità nel lavorare metallo duro cementato dimostrando però grandi limiti di costo e geometrie di taglio ottenibili [6]. Tuttavia, nonostante la fragilità del metallo duro in funzione dei suoi diversi gradi di composizione chimica, si è dimostrato come sia possibile generare un meccanismo di taglio duttile del materiale (cioè mediante deformazione a piani di scorrimento, come avviene per i materiali metallici omogenei e duttili), a patto che non venga superato uno spessore critico di truciolo [1]. Qualora gli utensili debbano avere piccole dimensioni e geometria complessa, come nel caso di foratura di piccoli diametri, la tecnologia abilitante è sicuramente quella dei rivestimenti applicati a utensili in metallo duro. Diversi sono i produttori che offrono soluzioni in tal senso anche se fino ad oggi la pratica industriale si è limitata all'adozione di tali utensili rivestiti per la lavorazione del materiale allo stato verde [7]. Solo recentissimamente, sono apparsi sul mercato utensili integrali con rivestimento diamantato CVD, capaci di lavorare i gradi più resistenti all'usura di WC-Co sinterizzato [8]. Tuttavia, in letteratura sono pochi gli studi scientifici dedicati a tale argomento [9,10] che confermano tale supposta efficacia in lavorazioni di fresatura. Questo studio rivolge invece l'attenzione alle operazioni di foratura effettuate con utensili in metallo duro rivestiti con tecnologia diamantata CVD per lavorazione di fori a piccolo diametro su metallo duro cementato.

MATERIALI E METODI: ESPERIMENTI DI MICROFORATURA

Si sono testate punte elicoidali (twist drills) dal diametro di 1.6 mm in metallo duro ricoperto con tecnologia CVD a filamento caldo (tecnologia brevettata) [8]. Le analisi al microscopio 3D confermano angolo in punta $\epsilon=130^\circ$, angolo d'elica $\delta=30^\circ$. Gli utensili mostrano due differenti zone di taglio ad angoli di spoglia frontale differenti (da $\gamma=25^\circ$ a $\gamma=-4^\circ$) con raggi di raccordo dei taglienti principali $CER=20\ \mu\text{m}$ (Cutting Edge Radius). Dall'analisi SEM, Fig. 1a, si conferma la regolarità del rivestimento in diamante su tutta la superficie della punta e l'aspetto di corrugazione superficiale tipico delle deposizioni a caldo di tipo CVD del diamante. Il materiale da lavorare è un grado medio di carburo di tungsteno (WC/Co) con il 10% in peso di cobalto e con grana scelta pari a 0.5-1.3 μm dalla durezza di 1550 HV. I provini cilindrici da lavorare (diametro $D=40\ \text{mm}$ e spessore $S=15\ \text{mm}$) sono ottenuti per pressatura, successiva sinterizzazione e rettifica di spianatura fino a rugosità $Ra=0.4\ \mu\text{m}$. Su di essi sono ottenuti fori in modo completamente randomizzato sia spazialmente che temporalmente distanziati di 0.36 mm (ispirandosi ad un'applicazione industriale reale), Fig 1c. Al fine di monitorare le lavorazioni si sono utilizzati sensori dinamometrici e torsionometrici, attrezzando il centro di lavoro ultra-preciso KERN Evo su cui si sono effettuati i test di taglio, Fig 1b.

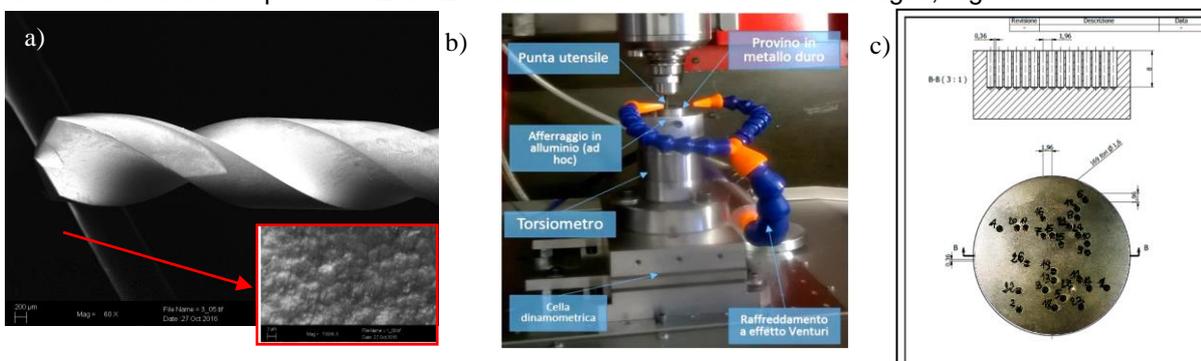


Fig. 1 – (a) Foto SEM dell'utensile di microforatura nuovo e aspetto superficiale del coating diamantato (b) Setup di taglio (c) Design del pezzo di prova in metallo duro Fig. 1 – (a) SEM pictures of the new tool and coating surface appearance (b) Cutting setup (c) Specimen design

Si sono ottenuti così fori ciechi con 8 mm di profondità sui provini fino a rottura completa dell'utensile, interrompendo regolarmente il processo di taglio per ispezionare lo stato di usura degli utensili stessi. La strategia di taglio utilizzata è stata peck-drilling ed i parametri di taglio adottati, suggeriti dal costruttore degli utensili, sono stati velocità di rotazione $n=3000$ rpm, avanzamento al dente $f_z=0.5$ mm/dente)

RISULTATI E DISCUSSIONE: MECCANISMI DI TAGLIO E USURA E QUALITA' OTTENIBILE

Dall'analisi dei trucioli post-lavorazione si conferma l'insorgenza di un meccanismo di taglio duttile. Si evidenziano trucioli correttamente formati caratterizzati da angoli di curvatura e piani di scorrimento compatibili con il processo di taglio. La componente di forze di taglio assiale spazia tra 80 e 250 N mostrando un visibile trend con l'usura degli utensili (analogamente a quanto ottenuto in precedenti studi in letteratura [11]), invece meno presente nei segnali di coppia di taglio, Fig.2a. Si evidenziano nei primissimi istanti di taglio, su tutti gli utensili testati, estese scheggiature (flaking) del rivestimento in diamante sul petto degli utensili, esponendo il metallo duro degli utensili alla lavorazione, Fig.2b. Nonostante tali danneggiamenti progrediscano con il tempo di contatto utensile-pezzo sembrano non pregiudicare sensibilmente la riuscita del processo. Da queste prime analisi della fenomenologia sembrerebbe che il meccanismo di taglio sia garantito dall'azione congiunta della zona di interfaccia del coating sul dorso dei taglienti e dai parametri di taglio scelti (che generano spessori di truciolo inferiori allo spessore del coating). Si riportano tuttavia fenomeni di adesione, compatibili con l'insorgenza di tagliente di riporto, sui taglienti principali e sulla zona centrale delle punte (chisel edge).

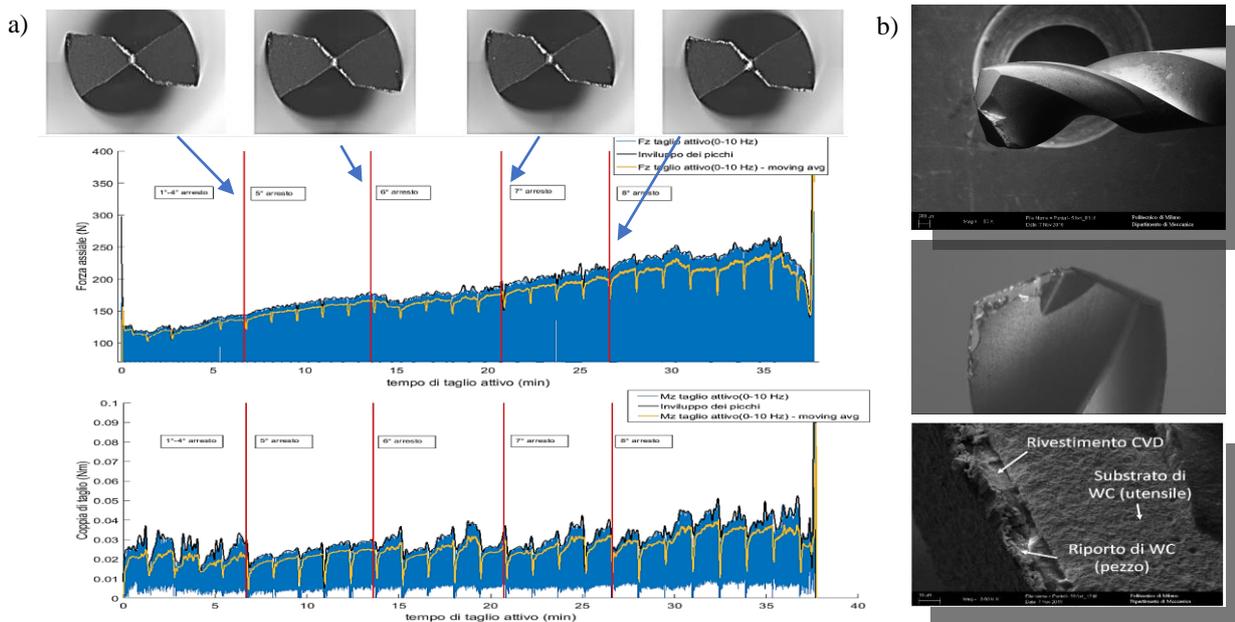


Fig. 2 – (a) Forza assiale e coppia di taglio (b) Foto SEM dell'utensile usurato Fig. 2 – (a) Thrust Force and Cutting Torque (b) SEM pictures of the worn tool

I volumi di truciolo rimossi con ognuno degli utensili testati si attestano tra i 627 e 1351 mm^3 , con tassi di rimozione effettiva di materiale nell'ordine di $\text{MRR}=0.21$ mm^3/min . I fori ottenuti appaiono di buona qualità e regolarità ed un'analisi della rugosità interna (ISO 4288:1996, cut-off di 80 μm), Fig.3a, conferma che la rugosità interna si aggira intorno a $R_a=0.06-0.07$ μm con una dispersione globale di ± 50 nm non governata dal fenomeno di usura degli utensili. Si denota tuttavia un leggero effetto della profondità dei fori laddove la qualità della superficie si deteriora leggermente con la profondità. Dal punto di vista dell'accuratezza geometrica sono in corso caratterizzazioni approfondite ma si confermano comunque buoni risultati. Si evidenziano tuttavia visibili difetti di frattura dei bordi superiori dei fori, riconducibili all'azione delle forze di taglio trasversali durante l'apertura frontale dei fori da parte degli utensili. La loro presenza non sembra essere governata globalmente dall'usura degli utensili fatta eccezione per gli ultimi fori prima della rottura di schianto degli utensili dove l'estensione radiale di tali difetti ha raggiunto circa 0.3 mm).

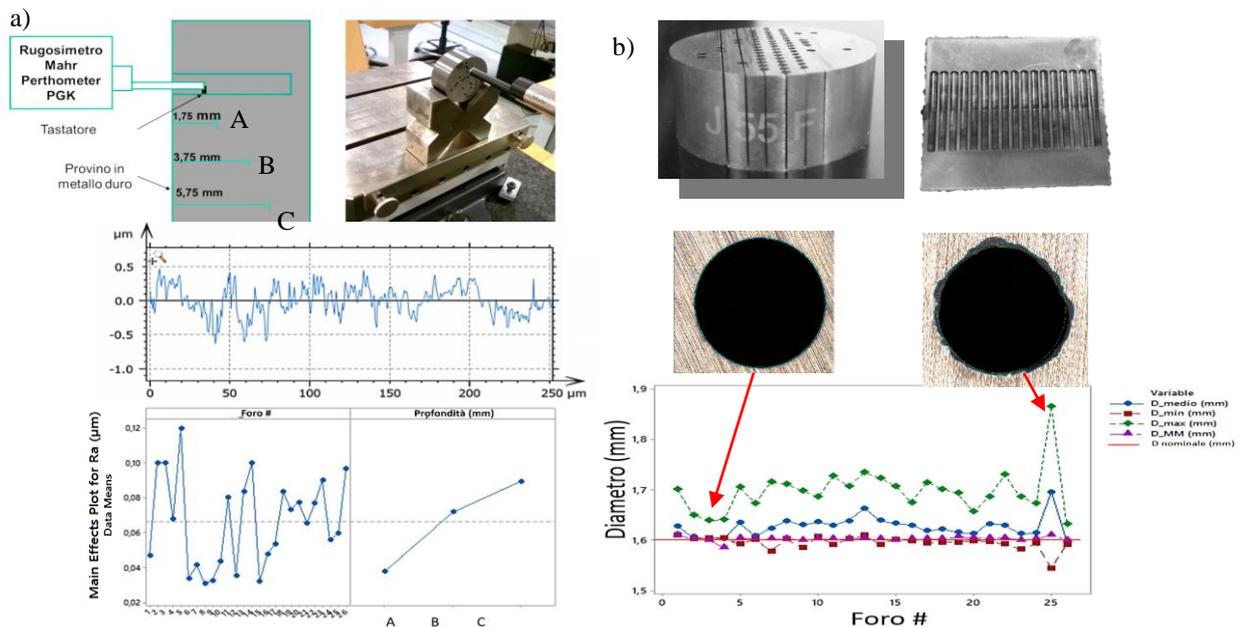


Fig. 3 – (a) Setup e dati di rugosità, esempio di profilo superficiale misurato e grafico degli effetti principali (b) Immagine dei fori ottenuti e analisi del diametro superiore dei fori Fig. 3 – (a) *Roughness measurement setup, measured profile sample, main effect plot* (b) *Cutted Holes (WireEDM sectioned) and upper diameter analysis plot*

CONCLUSIONI

Si conferma la possibilità di forare sui piccoli diametri ed elevate profondità il metallo duro con modalità di taglio duttile, favorendo elevata durata degli utensili testati. I meccanismi di usura dell'utensile coinvolti (fratturazione del coating) confermano il fatto che l'adesione del coating al substrato è uno dei limiti più importanti di questa tecnologia. La qualità superficiale dei fori prodotti è risultata competitiva con le qualità raggiungibili dai processi di elettroerosione. Lo studio di diversi gradi di carburo verrà affrontato in futuro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K. LIU, & X. LI, "Ductile cutting of tungsten carbide". J. Mater. Process. Technol. 2001; 113, 348–354.
- [2] G.P. DE GAUDENZI, Criteri di scelta del metallo duro per applicazioni diverse, Giornata di Studio "Materiali sinterizzati ad alte prestazioni", Padova, 14 dicembre 2006, AIM, Milano (2006).
- [3] G.P. DE GAUDENZI, Lavorazioni EDM: vince il metallo duro, Stampi (2000) 3/220-225.
- [4] M. P. JAHAN, M. RAHMAN, and Y. S. WONG, "A review on the conventional and micro-electro discharge machining of tungsten carbide," Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 51, no. 12, pp. 837–858, 2011.
- [5] J.B.J.W. HEGEMAN, J.T.M. DE HOSSON, G. DE WITH, "Grinding of WC-Co hardmetals", Wear, 248, 187-196, 2001.
- [6] T. MASUZAWA, "State of the Art of Micromachining" CIRP Ann. - Manuf. Technol., vol. 49, no. 2, pp. 473–488, 2000.
- [7] F. A. ALMEIDA, J. M. CARRAPICHANO, A. J. S. FERNANDES, J. SACRAMENTO, R. F. SILVA, and F. J. OLIVEIRA, "Nanocrystalline CVD diamond coatings for drilling of WC-Co parts," Int. J. Refract. Met. Hard Mater., vol. 29, no. 5, pp. 618–622, 2011
- [8] Union Tool Co., http://www.uniontool.co.jp/en/product/index_02.html, last access on 20 th, January 2017
- [9] H. SHIMADA, K. YANO, and Y. KANADA, "Sumidia binderless ball-nose endmills 'NPDB' for direct milling of cemented carbide," SEI Tech. Rev., no. 79, pp. 86–90, 2014.
- [10] M. OKADA, A. YOSHIDA, T. FURUMOTO, H. WATANABE, N. ASAKAWA, and M. OTSU, "Mechanisms and characteristics of direct cutting of tungsten carbide using a diamond-coated carbide end mill," Int. J. Adv. Manuf. Technol., pp. 1–13, 2016.
- [11] M. BELMONTE, F. J. OLIVEIRA, J. SACRAMENTO, A. J. S. FERNANDES, and R. F. SILVA, "Cutting forces evolution with tool wear in sintered hardmetal turning with CVD diamond," Diam. Relat. Mater., vol. 13, no. 4–8, pp. 843–847, 2004.