

PVD-PREVLEKE ZA ZAŠČITO ORODIJ ZA SUHO OBDELAVO

Peter Panjan

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Suha obdelava postaja danes vse bolj pomembna. Razlogi za to so predvsem ekološke in ekonomske narave. Če se odpovemo uporabi hladilno-mazalnih tekočin, potem se pri obdelavi pojavijo številni problemi zaradi povišanih temperatur, skrajšanja trajnosti orodja in težjega odvajanja odrezkov. Preiskusi so pokazali, da lahko trajnost orodja pri suhi obdelavi povečamo tako, da ga zaščitimo s kombinacijo trde prevleke in tanke plasti trdega maziva.

PVD coatings for protection of tools for dry machining

ABSTRACT

Today dry machining applications are more and more important. The motivation for this technology is both ecological and economical. However the elimination of metalworking fluids can cause a variety of machining problems related to heat, tool life and chip removal. In dry cutting operations, tests have shown that the lifetime of tools could be increased by using a tool that is coated by a combination of hard and lubricant layer.

1 UVOD

Obrabo orodij bistveno zmanjšamo z uporabo hladilno-mazalnih tekočin. Njihov pomen je naslednji: a) zmanjšajo trenje na stiku orodje-obdelovanec, b) odstranjujejo (odplakujejo) odrezke, c) hladijo orodje in d) orodje zaščitijo pred korozijo. Tako je npr. v primeru vrtnanja uporaba hladilno-mazalnih tekočin potrebna zato, ker odvajajo ostružke, ki bi se sicer nalepile na steno luknje. To bi bistveno poslabšalo kvaliteto obdelave površine. Hladilno-mazalne tekočine zmanjšajo tudi navor na sveder. Prav tako so neizogibne pri obdelavi materialov, ki se težko obdelujejo in pri zahtevnih obdelovalnih operacijah. Hlajenje in mazanje se uporablja pri obdelavi aluminijevih zlitin in nerjavečega jekla, tj. pri materialih, ki se radi lepijo na orodje.

Danes je večina tehnologov še vedno prepričana, da so hladilno-mazalne tekočine pri rezalnih postopkih obdelave neizogibno potrebne. V praksi je v mnogih primerih to res, vendar poznamo vse več obdelovalnih operacij, kjer niso potrebne oz. so celo škodljive. Primer so rezalna orodja, narejena iz novejših orodnih materialov, in visokohitrostna obdelava. Orodja iz karbidne trdine, prekrita z ustrežno zaščitno prevleko, režejo pri velikih hitrostih celo veliko bolj učinkovito, če jih ne hladimo. Rezilni rob se namreč pri visokohitrostnem frezanju zelo trdega materiala lahko segreje na temperaturo več kot 1000 °C. Zaradi velike centrifugalne sile frezala prispe do kontaktne površine z obdelovancem le malo

hladilno-mazalne tekočine, pa še ta se zaradi visoke temperature rezilnega robu večji del upari, preden prispe do vroče cone orodja. Efekt hlajenja je zato precej zmanjšan. Ker se rezilni rob hladi samo v fazi, ko ne reže, so temperaturne fluktuacije rezilnega robu frezala v primeru hlajenja večje kot pri suhem frezanju. Posledica so termični šoki, ki povzročijo nastanek mikrorazpok na površini orodja.

Uporaba maziv in hladilnih tekočin pri odrezovanju in drugih postopkih obdelave materialov se zmanjšuje tudi zaradi ekonomskih, ekoloških in zdravstvenih razlogov. Ekonomski razlogi so povezani zlasti s stroški odstranitve porabljenih maziv in hladiv, ki naraščajo progresivno in postajajo vedno pomembnejši dejavnik. Reciklaža ene tone hladilne emulzije stane približno 800 €. V Nemčiji, kjer porabijo približno 650.000 ton mazalnih olj na leto, je ta strošek okrog 500 milijonov evrov na leto. Ocenjuje se, da je danes strošek hladilno-mazalne emulzije do 17 % cene izdelka, medtem ko je bil pred dvema desetletjema le 3 %. Ti stroški so torej nekajkrat večji od stroškov delovne sile ali od stroškov izdelave orodij.

Hladilno-mazalne tekočine so tudi eden od virov onesnaževanja okolja. Do njihove izgube pride v sami proizvodnji (še zlasti, če se uporablja emulzija v obliki megle), delno med čiščenjem končnih izdelkov. Tudi odlaganje hladilno-mazalnih tekočin ogroža tla, pitno vodo in zrak, zato je nadzor nad tovrstnim onesnaževanjem iz leta v leto strožji. Tako se je npr. v Nemčiji število zakonov, ki regulirajo odpadna olja z dveh v letu 1950 povečalo na današnjih več kot 30. Stroške odstranitve hladilno-mazalnih tekočin je treba plačati ob njihovem nakupu v obliki posebnega davka.

Znano je tudi, da reakcijski produkti v obliki aerosolov, ki nastanejo med procesom obdelave, povzročajo zdravstvene težave delavcem v proizvodnji (kožne alergije, poškodbe pljuč, rakasta obolenja). Delavci so zlasti ogroženi, kadar se za hlajenje uporablja emulzija, razpršena v meglo. Po nekaterih ocenah ima kar 53 % kovinostrugarjev kožne probleme, ki so posledica stika z omenjenimi sredstvi.

V nekaterih primerih obstajajo tudi tehnološki razlogi za suho obdelavo. Tak primer je frezanje s prekinitvami rezanja, kjer pride zaradi uporabe hladilne tekočine do učinka toplotnega udara in posledično do nastanka mikrorazpok. Pri suhi obdelavi tega problema ni. Drug primer je proizvodnja prehranskih in farmacevtskih izdelkov (npr. pri

ekstruziji tub za shranjevanje zdravil), kjer ni dovoljena kontaminacija izdelka s tekočinami za mazanje.

2 SUHA OBDELAVA

Vse to so razlogi, da v zadnjih letih postaja suha obdelava, tj. obdelava brez uporabe hladilno-mazalnih tekočin, vse bolj aktualna ⁽¹⁻⁷⁾. Uporaba suhe obdelave je možna samo pod pogojem, da zagotavlja enako obstojnost orodja, enako kvaliteto obdelovanca (hrapavost obdelane površine, dimenzijske tolerance) in enako produktivnost kot v primeru uporabe hladilno-mazalne tekočine.

Suha obdelava prinaša vrsto tehničnih problemov. Pri takšni obdelavi imamo opraviti z izjemno velikimi termičnimi in mehanskimi obremenitvami. To pa seveda vodi do povečane obrabe in skrajšanja trajnosti orodja. Obdelava brez hladilno-mazalne tekočine povzroči probleme z dimenzijsko stabilnostjo, površina obdelovanca je bolj hrapava, pojavijo se različne termične poškodbe in deformacije. Zaradi deformacije materiala obdelovanca in trenja se med postopkom rezanja na rezalnem robu več kot 90 % mehanske energije pretvori v toploto. Pri suhi obdelavi se poveča trenje in adhezija med orodjem in obdelovancem, ker se med obdelovanjem oba segrejeta na višjo temperaturo. Zaradi visoke temperature se pri suhem struženju trdih materialov površinska plast razkali, podobno kot pri elektroerozijski obdelavi ali grobem brušenju.

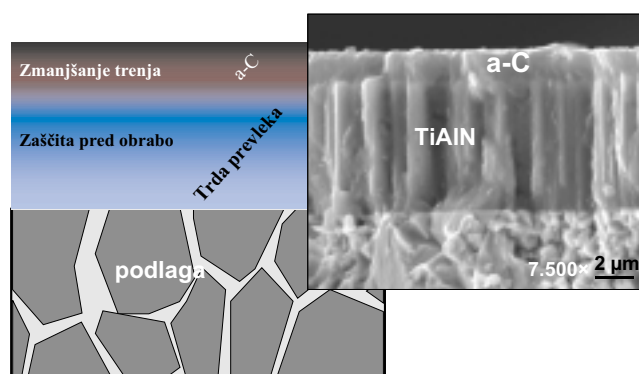
Suha obdelava zahteva spremenjeno geometrijo orodja. Tako je npr. pri suhem vrtanju problem odvajanje odrezkov iz luknje in deformacija luknje zaradi ekspanzije svedra pri visoki temperaturi. Prvi problem rešujejo s spremembo geometrije svedrov tako, da imajo odrezki več prostora za izhod. Drugi problem pa je možno rešiti tako, da ima telo svedra koničasto obliko (telo se zoži v smeri vpetja svedra). Orodje za suho obdelavo mora biti izdelano iz refraktornih materialov, da prenese visoke temperature. Hkrati mora biti čim trši in čim bolj žilav, da prenese velike mehanske obremenitve. Površina orodja pa mora biti praviloma zaščitena s prevleko, ki zmanjša trenje in adhezijo ter toplotne obremenitve orodja. Za hlajenje in odvajanje ostruškov je treba uporabiti curek stisnjene zraka.

Pri suhi obdelavi funkcijo hladilno-mazalne tekočine prevzamejo trde zaščitne prevleke ⁽¹⁻⁷⁾. Prevleka zmanjša trenje, poveča obrabno odpornost orodnega materiala in zmanjša ali prepreči nalepljanje materiala obdelovanca. Na površini prevleke niso zaželeni kemijske, mehanske ali tribološke interakcije z obdelovancem. Trde prevleke zmanjšajo temperaturne fluktuacije tako, da preprečujejo prenos toplote iz

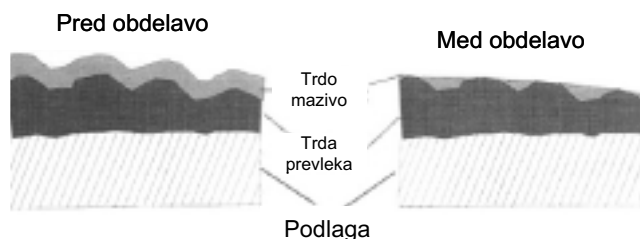
rezalne cone v orodje. Delujejo torej kot toplotna pregrada, ker imajo precej manjšo toplotno prevodnost kot material obdelovanca oz. orodja. Prekrita orodja zato absorbirajo manj toplote, zato prenesejo višje temperature. Da so termične napetosti v prevleki čim manjše, debelina le-teh ne sme biti prevelika. To je tudi razlog, da so npr. ploščice za freziranje praviloma prekrita s tanjšimi PVD-prevlekami, za katere so značilne tlačne napetosti, in ne s CVD-prevlekami, kjer so napetosti natezne, značilne debeline prevlek pa 5 μm do 10 μm . Tlačne napetosti v 2-3 μm debelih PVD-prevlekeh, zagotavljajo zelo dobro trdnost rezalnega robu, boljšo lomno žilavost in večjo upogibno trdnost. Za zaščito ploščic za struženje pa so primernejše CVD-prevleke.

Zaradi visokih temperatur pri suhi obdelavi pridejo v poštev le termično stabilne trde prevleke, kakršna je npr. (Ti,Al)N keramična prevleka. V primerjavi z drugimi je oksidacijsko najobstojnejša, hkrati pa je slab toplotni prevodnik, zato se večina sproščene toplote odvede v odrezek. Te lastnosti so posledica oksidacije vrhnje plasti prevleke, pri čemer nastane tanka plast aluminijevega oksida, ki se med obratovanjem orodja nenehno obnavlja. Plast aluminijevega oksida se odlikuje z veliko mikrotrodoto, kar poveča obrabno obstojnost orodja, hkrati pa ima majhen koeficient trenja glede na jeklo, kar zmanjša rezalne sile in količino sproščene toplote.

Še bolj kot enojna plast (Ti,Al)N se za zaščito orodij za suho obdelavo obnese kombinacija trde prevleke (npr. (Ti,Al)N) in tanke plasti trdega maziva (npr. a-C, WC/C, MoS₂, DLC) (slika 1). Funkcija trde prevleke je zaščita pred abrazijsko in oksidacijsko obrabo, medtem ko tanka plast trdega maziva bistveno zmanjša trenje, prepreči lepljenje in zmanjša termično obremenitev orodja. Čeprav se vrhnja plast kaj kmalu izrabi, ostane mazivo v vseh mikrokraterjih in porah, ki jih je zlasti zelo veliko v prevlekeh, ki so bile pripravljene s postopkom nanašanja s katodnim lokom



Slika 1: Kombinacija trde prevleke (TiAlN) in tanke plasti trdega maziva (a-C). Takšno prevleko, ki je primerna za zaščito orodij za suho obdelavo, lahko pripravimo v novi napravi CC800 v Centru za trde prevleke na Institutu "Jožef Stefan".



Slika 2: Shematski prikaz mehanizma mazanja površine orodja med procesom obdelovanja

(slika 2). V teh porah je mazivo vse do izrabe trde prevleke.

Možna področja uporabe kombiniranih prevlek te vrste so obdelava legiranih jekel, aluminijevih zlitin in litega železa. Specifični primeri uporabe so še vrtanje, vrezovanje navojev in frezanje aluminijevih zlitin. Uporabimo jih lahko tudi pri suhem preoblikovanju materialov, ki jih je težko obdelovati, kot so npr. magnezijeve zlitine, titanove zlitine in nerjaveče jeklo.

Za zaščito orodij za suho obdelavo je zelo primerna tudi prevleka na osnovi aluminijevega oksida. Takšna prevleka je izjemno trda, oksidacijsko in termično obstojna ter slab prevodnik toplote. To pa so ključne lastnosti, ki jih potrebujemo za zaščito orodij za suho obdelavo. CVD-postopek je bil dolgo časa edini primeren za nanos takšnih prevlek, danes pa jih je možno pripraviti tudi s PVD-postopki (naprševanjem).

Za suho obdelavo je posebej pomembna visoka trdota orodnega materiala v vročem stanju. Tako se npr. pri suhem frezanju litega železa pri 14.000 obratih/min in pomiku 39 m/min, rezilni rob segreje na temperaturo med 600 °C in 700 °C. To pa je previsoka temperatura za uporabo frezal iz konvencionalnih orodnih materialov. Vedeti moramo, da se trdota vseh orodnih materialov z naraščajočo temperaturo zmanjšuje, najbolj pri ogljikovih jeklih in hitroreznem jeklu. Hitrorezna jekla zaradi popuščanja pri temperaturi nad 500 °C za suho obdelavo niso primerna. Karbidne trdine so uporabne, vendar pod pogojem, da je orodje prekrito z ustrežno zaščitno prevleko.

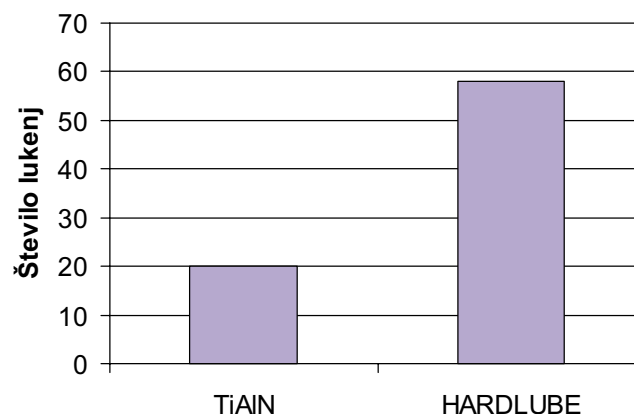
Visokohitrostna suha obdelava zahteva najsodobnejše orodne materiale, kot so kermeti, kubični borov nitrid in keramike (na osnovi silicijevega nitrida ali aluminijevega oksida). Tudi polikristalinični diamant je primeren za suho obdelavo, vendar le neferitnih materialov. Orodja iz teh materialov lahko uporabimo za suho obdelavo brez dodatne zaščitne prevleke. Za vse te naštetje materiale je značilna visoka trdota v vročem stanju in velika odpornost proti abraziji, vendar pa so zelo krhki.

Kermeti npr. prenesejo veliko večje temperature kot karbidna trdina, vendar so v primerjavi z njo bistveno manj žilavi in odporni proti mehanskim

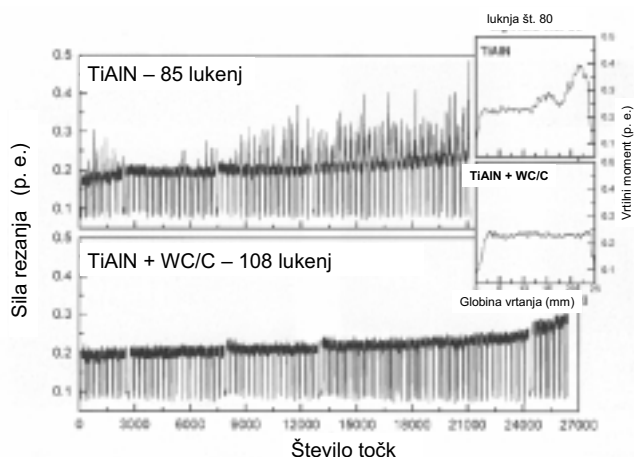
šokom. Kovinsko vezivo omejuje trdoto v vročem stanju, zato lahko s kermetnimi orodji obdelujemo materiale do trdote približno 40 HRC. Kermetne rezalne ploščice so idealne za fino suho obdelavo pri velikih hitrostih obdelave, pri majhnih pomikih in rezanju brez prekinitev. Pri tem ni nevarnosti nalepljanja materiala obdelovanca na rezilni rob. Niso pa primerne za obdelavo zelo trdih materialov in za grobo in srednje grobo obdelavo.

Tudi keramična orodja, ki so kemijsko zelo stabilna glede na material obdelovanca, lahko uporabimo za visokohitrostno obdelavo, končno obdelavo feritnih materialov in sive litine. Ne obnesejo pa se dobro pri obdelavi aluminijevih zlitin. Čisti aluminijev oksid ima izjemno veliko termično obstojnost in trdoto v vročem stanju, njegova slaba stran pa je majhna trdnost in žilavost. Z dodatkom viskerjev silicijevega karbida se omenjene slabosti precej odpravi. Podobno kot aluminijev oksid ima tudi silicijev nitrid visoko trdoto v vročem stanju, precej bolje pa prenaša termične in mehanske šoke. Vendar pa njegova kemijska stabilnost pri obdelavi jekla v primerjavi z aluminijevim oksidom ni tako dobra.

Kubični borov nitrid (c-BN), ki je ekstremno trd orodni material, se uporablja za obdelavo materialov, katerih trdota je večja od 48 HRC (c-BN se obrablja hitreje pri obdelavi mehkejših materialov). Ima visoko trdoto v vročem stanju vse do 2000 °C. Čeprav je bolj krhek kot karbidna trdina in manj termično in kemijsko stabilen kot keramika, ima v primerjavi z njo večjo udarno trdnost in lomno žilavost. c-BN je odličen toplotni prevodnik in relativno žilav material, zato je primeren za obdelavo pri velikih hitrostih rezanja, obdelavo s prekinitvami in pri relativno velikih obremenitvah rezalnega robu. Končna fina



Slika 3: Testni rezultat za primer suhega vrtanja s svedrom (premer 7,8 mm) iz karbidne trdine, ki je bil zaščiten z Balzersovima prevlekama TiAlN in Hardlube (TiAlN-WC/C). Obdelovanec je bil UTOP Mo1 (H11, DIN-1.2343) toplotno obdelan na 50 HRC. Parametri vrtanja: rezalna hitrost 80 m/min, pomik 0,12 mm/obrat, vrtali so slepe luknje, hlajenje s curkom stisnjenega zraka.



Slika 4: Sila rezanja na svedra HSS (premer 6 mm), prekrita s prevleko TiAlN in TiAlN+WC/C (Hardlube, Balzers), med vrtnjem ogljikovega orodnega jekla OCR 12 (DIN 1.2080, AISI D3). Parametri vrtnja so bili naslednji: hitrost rezanja: 20 m/min, pomik: 0,12 mm/obrat, globina vrtnja: 25 mm, hlajenje s curkom stisnjene zraka.

obdelava trdih materialov s ploščicami c-BN izpodriva drago in zahtevno obdelavo z brušenjem.

Najtrši in abrazijsko najodpornejši orodni material, polikristalinični diamant, je primeren samo za obdelavo neferitnih materialov. Če konico iz polikristaliničnega diamanta pritrdimo na ploščico iz karbidne trdine, se trajnost takšnega orodja poveča do 100-krat. Najpogostejši primer uporabe takšnih orodij je obdelava zelo abrazivnega aluminija, ki ima veliko vsebnost silicija.

3 PRIMERI UPORABE SUHE OBDELAVE

Na koncu omenimo še nekaj konkretnih primerov uporabe suhe obdelave. Za struženje in frezanje sive litine brez uporabe hladilno-mazalnih tekočin pridejo v poštev orodja iz keramičnih materialov in kubični borov nitrid. Ker ima c-BN večjo toplotno prevodnost kot keramični materiali, odvaja takšno orodje toploto veliko bolj učinkovito, zato je zelo primerno za visokohitrostno obdelavo. Lito železo lahko suho frezamo tudi s kermetnimi ploščicami pri velikih hitrostih obdelave. Obdelava pri velikih hitrostih je v tem primeru potrebna ne le za skrajšanje časa obdelave, temveč za skrajšanje kontaktnega časa med orodjem in obdelovancem in s tem prehod toplote z odrezka na orodje.

Pri frezanju superzlitin in titana s prekinitvami hlajenje povzroči termične šoke v vseh orodnih

materialih, zato se v takem primeru priporoča suha obdelava. Pri kontinuirni visokohitrostni obdelavi teh materialov pa je hlajenje potrebno.

Z vidika suhe obdelave je aluminij in njegove zlitine najbolj problematičen material. Zaradi njegove velike toplotne prevodnosti se v obdelovancu absorbira veliko toplote, kar povzroči deformacije zaradi njegove velike termične razteznosti. Problemi se pojavijo tudi pri sami tvorbi odrezkov. Zato je v primeru obdelave aluminija orodje treba zaščititi z ustrežno prevleko.

Pri suhi obdelavi neferitnih materialov se najbolje obnesejo orodja iz polikristaliničnega diamanta, ki se odlikuje z veliko toplotno prevodnostjo in kemijsko inertnostjo do aluminija.

Sliki 3 in 4 prikazujeta konkretne rezultate testov svedrov, ki so bili prekriti s kombinacijo trde prevleke in tanke plasti trdega maziva. Vidimo, da tanka plast trdega maziva WC/C bistveno podaljša trajnost svedra in zmanjša sila rezanja.

4 SKLEP

Suha obdelava različnih materialov obdelovancev postaja v zadnjih letih, zaradi vse večjih stroškov hladilno-mazalnih tekočin in zaradi njihove nevarnosti za okolje in zdravje ljudi, vse bolj aktualna. Za postopke suhe obdelave je ključnega pomena, da orodje ustrežno zaščitimo. Zaenkrat se je v ta namen najbolje obnesla kombinacija trde prevleke in tanke plasti trdega maziva. Takšno kombinacijo prevlek lahko pripravimo tudi v naši novi napravi. Najprej na podlago nanesimo približno 3 μm debelo plast TiAlN, nato pa še tanko plast (približno 1 μm) amorfne ogljika.

5 LITERATURA

- ¹V. Deflinger, H. Brandle, H. Zimmermann, Surf. Coat. Technol. 113 (1999) 286–292
- ²T. Cselle, A. Barimani, Surf. Coat. Technol. 76–77 (1995) 712–718
- ³P. S. Sreejith, B. K. A. Ngoi, J. Mat. Proc. Technol., 101 (2000) 287–291
- ⁴N. M. Renevier, J. Hampshire, V. C. Fox, J. Witts, T. Allen, D. G. Teer, Surf. Coat. Technol. 142–144 (2001) 67–77
- ⁵H. K. Tonshoff, A. Mohlfeld, Surf. Coat. Technol. 93 (1997) 88–92
- ⁶M. Lahres, O. Doerfel, R. Neumuller, Surf. Coat. Technol. 120–121 (1999) 687–691
- ⁷I. J. Smith, W. D. Munz, L. A. Donohue, I. Petrov, J. E. Greene, Surf. Eng., vol. 14, 1 (1998) 37–39