

ZAŠČITA ORODIJ ZA PREOBLIKOVANJE PLOČEVINE S TRDIMI ZAŠČITNIMI PREVLEKAMI (2. DEL)

Peter Panjan

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

V prvem delu tega prispevka so bili opisani mehanizmi obrabe orodja pri preoblikovanju pločevine. Podrobneje smo obravnavali prednosti in slabosti PVD-, CVD- in PACVD-postopkov nanašanja trdih zaščitnih prevlek na takšna orodja. V drugem delu obravnavamo pripravo površine orodij, problem mazanja orodij in možnosti uporabe trdih maziv. Opisane so različne PVD in CVD trde prevleke, ki so primerne za zaščito orodij za preoblikovanje.

PVD coatings for protection of tools for steel sheet drawing and forming (Part II)

ABSTRACT

In the first part of this paper the wear mechanisms which are active at sheet forming were described. Advantages and disadvantages of PVD, CVD and PACVD hard coating deposition methods for protection of such tools were discussed. In the second part the tool surface pretreatment, the problem of tool lubrication and possibility of the use of solid lubricants in the form of thin films are described. The suitability of various PVD and CVD coatings for protection of forming tools is also discussed.

1 UVOD

V zadnjih letih so se pojavila različna nova trda maziva v obliki tankih plasti, ki zagotavljajo boljše in ekološko neoporečno mazanje. V tem prispevku opisujemo najnovejši razvoj na področju zaščite orodij za hladno preoblikovanje in na področju trdih mazivnih prevlek.

2 PRIPRAVA ORODIJ PRED NANOSOM PVD-PREVLEKE

Orodja, ki jih nameravamo zaščititi s trdimi prevlekami, moramo skrbno pripraviti. Bistveni procesni koraki pri sami izdelavi orodja so naslednji:

- izbira ustreznega orodnega materiala; za hladno preoblikovanje se uporabljajo orodna jekla za delo v hladnem, ki imajo visoko trdoto po kaljenju in popuščanju (>60 HRC)
- popuščanje napetosti pri 600 °C
- končna obdelava
- kaljenje v vakuumu
- najmanj dvakratno popuščanje pri temperaturi blizu 500 °C (trdota mora biti 58–60 HRC)
- montaža in nastavitve orodja
- poizkusna serija 5000–10000 izdelkov za homologacijo
- površinska obdelava orodja (poliranje in čiščenje)
- CVD- ali PVD-nanos

- v primeru CVD-postopka moramo ponoviti kaljenje in popuščanje v vakuumu
- montaža orodja in preizkus le-tega.

Praviloma se prekrivajo nova orodja. Lahko pa naredimo nanos tudi na obnovljena orodja, vendar moramo staro plast predhodno odstraniti, poškodovana mesta pa obnoviti (zavariti). Kadar je treba orodje popraviti z navarjanjem, moramo to izvesti v naslednjih korakih, ki zagotavljajo, da doseže navarjeni material enake karakteristike, kot jih ima osnovni: a) segreti orodje na temperaturo 400 °C, b) navariti ustrezen material, c) da odpravimo nastale napetosti, moramo orodje segreti na temperaturo 450 °C za 2–3 ure in nato ohladiti. Zvar mora biti zvezen in neporozen.

Pri pripravi površine orodja pred nanosom trde prevleke je treba upoštevati še celo vrsto pravil, ki zagotovijo nanos kvalitetne trde prevleke:

- Površina orodja mora biti kovinsko svetla, brez ostankov barve in drugih kontaminantov.
- Površina orodja mora biti brez mikrorazpok, oksidne plasti in razkaljene površinske plasti. Z mehanskimi postopki (poliranje, mikropeskanje) moramo odstraniti ostanke predhodne obdelave površine orodja (npr. "bela" razkaljena plast, ki nastane med potopno erozijo (EDM), spojinska plast, ki nastane med ionskim nitriranjem, ali oksidna plast, ki nastane med toplotno obdelavo).
- Tudi topografija površine vzorca (način brušenja) je zelo pomemben parameter. Nepravilno brušenje lahko povzroči razkalitev površinske plasti orodja (celo do globine 30 µm). V zadnji fazi brušenja so najprimernejše brusne plošče iz kubičnega bor nitrida, ki ne puščajo ostankov na površini orodja. Korundna zrna pogosto povzročajo plastične mikrodeformacije na površini, ki so vzrok za slabšo oprijemljivost prevleke. Brusne plošče, ki vsebujejo silicijeve spojine, niso primerne, ker ostanki silicija na površini orodja poslabšajo oprijemljivost prevlek. Brušenje v transverzalni smeri (pravokotno na smer tečenja) zmanjša upogibno trdnost orodja. Pri brušenju z izrabljenimi brusnimi ploščami in pri nepravilnem hlajenju pa pride pogosto do lokalnega pregretja površine, kar povzroči nastanek razpok zaradi napetosti in lokalne razkalitve.
- Polirana površina mora biti brez ostankov predhodne obdelave (kalilne soli, polirna sredstva, prah od brušenja).

- Sestavljeni deli orodja morajo biti razstavljeni. Vse vijake in druge vložke moramo odstraniti, da omogočimo čiščenje kompletne površine: hladilni kanali morajo biti odprti in očiščeni.
- Na prispajkane dele lahko naneseemo PVD-prevleko, vendar le, če je temperaturno obstojna do 600 °C in če ne vsebuje kadmija in cinka.
- Površina orodja ne sme biti peskana s steklenimi kroglicami.
- Poškodovano mesto na površini orodja, ki je bilo popravljeno z varjenjem, je primerno za nanos prevleke, vendar le, če je zvar zvezen in neporozen. Po varjenju je treba orodje popuščati, da se odstranijo napetosti.
- Hrapavost površine orodja ima velik vpliv na obstojnost orodja, zato morajo biti vse funkcionalne površine polirane. Delovna površina orodja mora biti polirana do hrapavosti $R_a < 0,4 \mu\text{m}$. Obstojnost prekritega orodja in končna obdelava izdelkov sta zelo odvisni od priprave površine orodja.
- Če je bilo orodje predhodno že prekrito s trdo prevleko, moramo ostanke plasti odstraniti mehansko (peskanje) ali kemijsko. Pri mehanskem odstranjevanju moramo površino ponovno polirati.
- Orodja naj bodo pred transportom naoljena z vodotopnim oljem, da ne pride do korozije.

3 MAZANJE ORODIJ ZA HLADNO PREOBLIKOVANJE IN NOVEJŠI RAZVOJ NA TEM PODROČJU

Orodja za hladno preoblikovanje je treba med delovanjem mazati, da se zmanjša kontaktni pritisk in trenje ter pospeši drsenje. Mazalna tekočina tudi pomaga odstraniti toploto, ki med obdelovanjem nastane zaradi trenja.

Pri manj zahtevnih operacijah hladnega preoblikovanja uporabljamo za mazanje mineralno olje z dodatki aditivov. Ker se med preoblikovanjem veliko olja izgubi na izdelkih ter stroju in ker so oljne megle zdravju škodljive, poskušajo tehnologi uporabo olj v čim večji meri zmanjšati. Pri zahtevnejših operacijah preoblikovanja se uporabljajo olja z različnimi aditivi, kot so: klor, fosfor, žveplo, cink itd. Zlasti problematično je mazanje orodij za hladno preoblikovanje aluminijeve in titanove pločevine.

Uporaba prej naštetih aditivov je nevarna iz več razlogov. Kloriran parafin je zelo težko upepeliti, ne da bi pri tem nastal zdravju škodljiv dioksin. Aditivi na osnovi žvepla so nekompatibilni z neferitnimi komponentami obdelovalnega stroja in povzročajo smrad. Aditivi na osnovi cinka, ki pridejo v odpadne vode, so ekološko nevarni. Ekstremno hitri preoblikovalni stroji, visoke temperature in obdelovanje vse bolj eksotičnih zlitin povzročajo razgradnjo maziv.

Med sežiganjem in polimerizacijo sestavin maziva nastajajo kemijske substance, za katere se upravičeno domneva, da so nevarne za zdravje ljudi. Da bi se delavci zavarovali pred temi nevarnimi vplivi, so potrebni posebni sistemi za odzračevanje, elektrostatični filtri in zaščitne obleke.

Preveč intenzivna uporaba maziv in uporaba neprimernih maziv zahtevata vse bolj intenzivno čiščenje obdelovancev po izvedbi preoblikovalnih operacij in pred vgradnjo v končni proizvod ali pred nadaljnjimi postopki (barvanje, galvaniziranje, varjenje itd.). Stroški čiščenja lahko dosežejo tudi 10 % cene proizvoda.

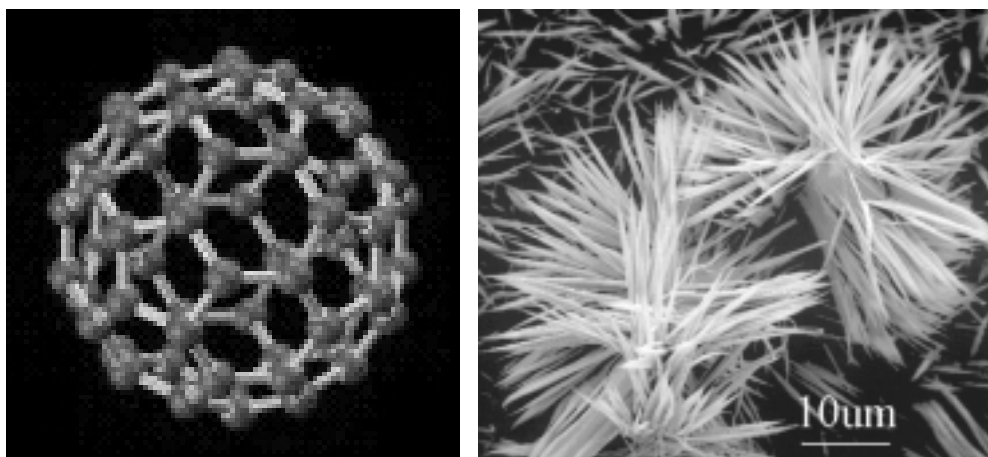
Kvaliteto tekočih maziv poskušajo v zadnjih letih izboljšati z dodatkom raznih aditivov v obliki nanodelcev **fulerenov**, ogljikovih in **WS₂-nanocevk** (slika 1), dihalogenidov prehodnih kovin ali z dodatkom borove kisline.

Pri mnogih primerih obdelave uporaba tekočega maziva ni možna ali priporočljiva, v nekaterih primerih je celo prepovedana (farmaceutvska, tekstilna in prehrabna industrija). V nekaterih primerih je strošek maziva prevelik. V nekaterih drugih primerih pa lahko pride zaradi komplicirane geometrije do slabega mazanja določenih delov orodja. Suha obdelava zaradi velike obrabe orodij ne pride v poštev. V naštetih primerih lahko probleme rešimo tako, da orodje prekrijemo s **tanko plastjo trdega maziva** ⁽¹⁾. Plast trdega maziva lahko v celoti nadomesti tekoče mazivo ali pa omogoči, da količino uporabljenega tekočega maziva bistveno zmanjšamo.

Od trdih maziv se najpogosteje uporabljajo prevleke na osnovi grafita ali molibdenovega disulfida. V splošnem gre razvoj v smeri iskanja materialov, ki bi hkrati zagotavljali dobro oprijemljivost na podlago, veliko mikrotrdoto in majhen koeficient trenja. To lahko dosežemo na več načinov:

- Na trdo prevleko naneseemo tanko plast trdega maziva. 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 prevlekah, ki so bile pripravljene s postopkom nanašanja s katodnim lokom. V teh porah je mazivo vse do izrabe trde prevleke (slika 2).
- Tanki plasti trdega maziva dodamo kovinsko komponento, npr. MoS₂+Ti (MoST[®]), CrC+C, WC/C (Balinit[®] C), Me-C:H. Takšne prevleke zagotavljajo poleg majhnega koeficienta trenja tudi dobro adhezijo na podlago.

Trdo samomazivno prevleko lahko pripravimo v obliki nanokompozita (slika 3). Nanokompozitne prevleke so narejene iz nanokristalinične faze trdega

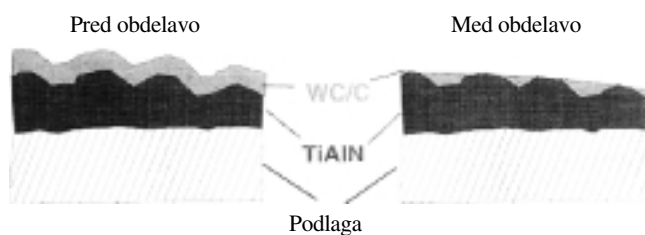


Slika 1: Model fulerena C60 (levo) in MoS₂ nanocevke (desno), ki so jih prvi na svetu naredili na Institutu "Jožef Stefan" v Odseku za fiziko trde snovi ⁽²⁾.

materiala (npr. TiN, TiC) in amorfne trde faze (npr. a-C, a-Si₃N₄, a-TiB₂) ali pa iz nanokristalinične trde faze (npr. TiN, TiC) in amorfne mehke kovine (npr. Cu, Ni, Y, Ag, Co). Takšne strukture se odlikujejo z izjemno visoko trdoto in žilavostjo.

Najnovejši razvoj na tem področju gre v smeri oblikovanja strukture kanalov ali por po površini trde prevleke z uporabo plazemskega, kemijskega ali laserskega jedkanja. Najobetavnejša je obdelava z laserjem (slika 4). Z ultrakratkimi pulzi laserske svetlobe (v področju 100 fs) lahko odparimo kakršenkoli material brez negativnih stranskih učinkov v osnovnem materialu (npr. termičnih). Značilna globina por je >10 μm, kar je več kot debelina prevleke, periodičnost strukture pa 15-30 μm. Pozitiven učinek take laserske obdelave površine je v tem, da se v takšne pore ujamejo odtrgani delci, hkrati pa se pore napolnijo z mazivom. Pozitiven vpliv laserskega vzorčenja je tudi v tem, da se skozi takšne pore lažje odvaja toplota. Z lasersko obdelavo TiN- in TiCN-prevlek so povečali obstojnost orodja tudi za faktor 10.

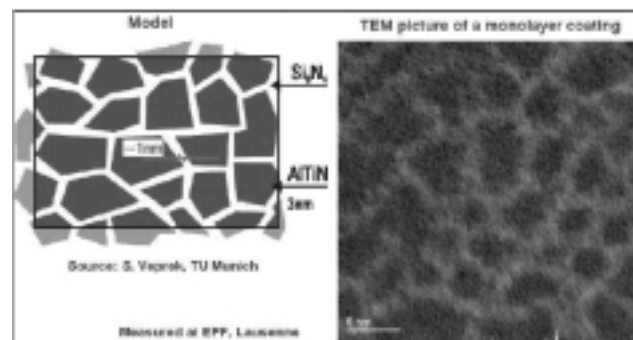
V literaturi najdemo tudi poročila o t. i. **pametnih ("smart") prevlekah** ⁽¹⁾. To so prevleke, ki spremenijo svoje lastnosti tako, da se v čim večji meri prilagodijo razmeram med obratovanjem orodja.



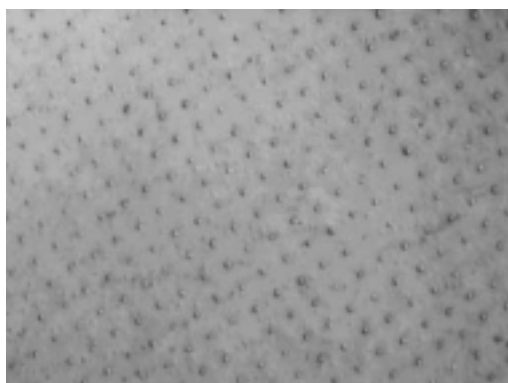
Slika 2: Shematski prikaz mehanizma mazanja površine orodja, zaščitene s TiAlN-WC/C-prevleko med procesom obdelovanja

Primer so npr. kompozitne prevleke, ki so sestavljene iz nanokristaliničnega WC (1–2 nm) in nanokristaliničnega WS₂ (5–10 nm). Obe fazi sta vloženi v amorfno matrico DLC. Nanokompozit WC/DLC/WS₂ ima sposobnost samoprilagoditve razmeram delovanja, ki se pojavijo med tribološko operacijo. Ta prilagoditev se kaže v kristalizaciji in reorientaciji prvotno naključno razporejenih nanokristaliničnih delcev WS₂, grafitizaciji prvotno amorfne DLC-matrice in drugih medsebojnih vplivih pozameznih faz.

Drug primer so samomazivne trde prevleke, ki lahko delujejo v širokem temperaturnem področju. Pripravimo jih lahko v obliki nanokompozitov ali v obliki večplastnih struktur, ki so kombinacija nizkotemperaturnega in visokotemperaturnega maziva (npr. CaF₂/WS₂). Med obratovanjem pride zaradi trenja do nastanka faze CaSO₄. Na podoben način lahko kombiniramo tudi dihalogenide prehodnih kovin (npr. MoS₂, WS₂) z oksidi (ZnO, PbO), pri čemer nastaneta PbMoO₄ ali ZnWO₄, ki sta odlični mazivi pri visokih temperaturah.



Slika 3: Shema nanokompozitne prevleke (levo) in TEM-posnetek nanokompozitne prevleke AlTiN/Si₃N₄ (EPF, Lausanne)

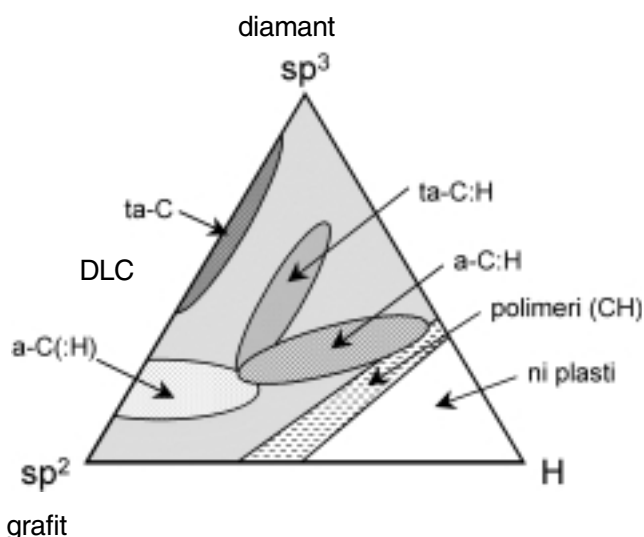
Slika 4: Površina TiN-prevleke, modificirane z laserjem ⁽³⁾

4 TANKE PLASTI TRDIH MAZIV, NAREJENIH S PVD-POSTOPKI

Tanke plasti trdih maziv na osnovi ogljika ⁽⁴⁾

Ogljik tvori tri vrste kemijskih vezi: sp^3 in sp^2 ter sp^1 . sp^3 -vezi so značilne za diamant, sp^2 pa za grafit. Z izbiro primernih pogojev izdelave lahko pripravimo ogljik s skoraj poljubnim razmerjem vezi $sp^3:sp^2$, pri čemer so lastnosti plasti še močno odvisne od velikosti kristalnih zrn. Lahko nastane tudi amorfnafaza. Ker prevleke pogosto izdelujemo v reaktivni atmosferi nižjih ogljikovodikov, se v prevleko vgradi tudi vodik. V koncentracijskem trikotniku ternarnega sistema sp^3 -ogljik – sp^2 -ogljik – vodik (slika 5) je v ogljišču pri sp^3 diamant, v ogljišču pri sp^2 pa grafit, kakor tudi nekaj drugih urejenih (fulereni, ogljikove nanocevke) in amorfne faze (steklasti ogljik, neparjeni ogljik, saje).

Z naprševanjem lahko izdelamo amorfne ogljikove prevleke, kjer je del vezi v obliki sp^2 , označujemo jih z a-C. Za prevleke z dovolj visokim deležem sp^3 -vezi se je uveljavilo ime tetraedrični amorfni ogljik (ta-C). Če prevleke vsebujejo tudi nekaj vodika, govorimo o

Slika 5: Koncentracijski trikotnik sp^2 - sp^3 -H

hidrogeniranih prevlekah: a-C:H in ta-C:H. Pri višjih deležih vodika dobimo polimere. Za prevleke z znatnim deležem sp^3 -vezi je uveljavljeno ime **diamantu podoben ogljik** (DLC – *diamond-like carbon*). "DLC" je torej širše ime za več vrst materialov na osnovi ogljika, čeprav se ga v literaturi pogosto zamenjuje z zapisom "C:H", ki je dejansko le ena od oblik DLC.

Lastnosti DLC so v precejšnji meri podobne lastnostim diamanta, kot so visoka trdota in kemična inertnost. Mehanske, električne in optične lastnosti takšnih plasti so odvisne predvsem od razmerja diamantnih in grafitnih kemijskih vezi. Glede na njuno razmerje in glede na način priprave poznamo zelo širok spekter DLC-plasti, ki se med seboj razlikujejo predvsem po trdoti in koeficientu trenja. Z vidika uporabe so problem velike notranje napetosti v DLC-plasteh in njihova slaba oprijemljivost na podlage iz jekla. Problem rešujejo na različne načine.

Največ obeta sočasen nanos DLC in kovine. Takšne kompozitne prevleke pogosto označujejo z

Tabela 1: Klasifikacija trdih maziv ⁽¹⁾

Tip materiala	Princip mazanja	Primer
Mehki materiali	Čiste kovine	Pb, In, Sn, Ag, Au
	Mehki materiali pri visoki temperaturi	CaF ₂ , BaF ₂
	Drugi anorganski materiali	PbO, PbS, CdO
Trdi materiali z lamelno strukturo	Plastni kristali	Dihalkogenidi: MoS ₂ , WS ₂ , TaS ₂ , diteluridi, diselenidi
	Adsorbirana voda ali organska spojina sta potrebni, da omogočita strig	Grafit in heksagonalni BN
	Plastni kristali z interkaliranimi atomi	Ag _x NbS ₂
Polimeri	Polimeri z gladko molekularno strukturo (brez stranskih skupin)	PTFE, FEP, PFA, PTFCE, najlon, poliamid, vosek, maščobna kislina, estri
Konverzijske kemijske plasti	Plast površinskega oksida preprečuje hladni zvar in omogoča strižno drsenje	Oksidne plasti
	Porozna površina zagotavlja shranjevanje tekočega maziva v porah	Anodna oksidacija
	Površine s povišano trdoto in manjšim koeficientom trenja	Fosfatirane površine

Me-C:H, kjer je Me izbrana kovina (npr. W, Cr, Ti). Struktura je do neke mere podobna kot v karbidnih trdinah (npr. Co + WC), kjer kovinska matrika zagotavlja žilavost, trdi delci pa trdoto, seveda pa je postopek izdelave popolnoma drugačen. V plasteh Me-C:H pride tudi do nastanka karbidov, ki so v splošnem kemijsko stabilni in imajo odlične mehanske lastnosti tudi pri povišani temperaturi.

Kovina poveča delež grafitnih vezi, zato so take prevleke uporabne kot samomazivne plasti. Medtem ko ima večina trdih prevlek koeficient trenja 0,4–0,6, imajo DLC-plasti znatno nižji koeficient trenja (0,1–0,2). Ker imajo relativno veliko trdoto (2000 HV), je njihova obrabna obstojnost večja od konvencionalnih trdih prevlek. V tribologiji so se DLC-prevleke uveljavile predvsem kot trdo mazivo za zaščito strojnih delov. V ta namen se uporabljajo predvsem prevleke WC/C, ki so v bistvu DLC-plasti, stabilizirane z nanokristaliničnimi delci WC.

Trda maziva na osnovi molibdenovega disulfida

MoST®-prevleke so narejene na osnovi molibdenovega sulfida in titana. Pripravimo jih s kodepozicijo titana in molibdenovega disulfida, pri čemer je delež titana majhen. Prevleko pripravimo z naprščevanjem v t. i. "unbalanced" magnetronu s štirimi izviri (1 Ti + 3 MoS₂). Trda mazivna prevleka MoST® dramatično poveča trajnost orodij za preoblikovanje, ker zmanjša adhezijsko in abrazijsko obrabo, ki sta najpogostejši obliki obrabe orodij za preoblikovanje. Odlikuje se z majhnim koeficientom trenja (0,01–0,06), ki je nižji od koeficienta trenja za teflon ali grafit. Hkrati se odlikuje z veliko trdoto (2000 HV). MoST®-prevleke se priporočajo za zaščito orodij za suho preoblikovanje ogljikovih jekel, legiranih jekel (npr. HSLA), galvansko ali kako drugače prekrute pločevine, nerjavečega jekla, aluminijevih in bakrovih zlitin.

5 PVD-PREVLEKE ZA ZAŠČITO ORODIJ ZA HLADNO PREOBLIKOVANJE

PVD-prevleke se uporabljajo za zaščito orodij za preoblikovanje v naslednjih primerih:

- kadar preoblikujemo tanke pločevine z manjšo natezno trdnostjo
- kadar preoblikujemo galvansko oz. elektrokemijsko zaščitene pločevine
- v razmerah zmanjšane mazanja
- kadar se površina matrice med preoblikovanjem segreje.

TiN-prevleka

S TiN-prevleko učinkovito zaščitimo orodja za hladno preoblikovanje in orodja za brizganje plastike. TiN je idealna prevleka za zaščito rezalnih orodij, ki delajo pri majhnih hitrostih rezanja, saj zelo zmanjša adhezijsko obrabo. Na orodjih za hladno preoblikovanje TiN-prevleka bistveno zmanjša hladno navarjanje materiala, zmanjša abrazijsko obrabo in omogoča delo z manj maziva. Oksidacijsko je obstojna do 500 °C. Ni primerna za zaščito orodij za preoblikovanje neferitnih materialov.

CrN-prevleka

CrN-prevleka se zelo pogosto uporablja za zaščito orodij za hladno preoblikovanje, ker je relativno trda (1800–2000 HV, antiabrazijsko delovanje) in ima v primerjavi s kombinacijo jeklo-jeklo za 20–30 % manjši koeficient trenja. CrN-prevleka je oksidacijsko obstojna do 700 °C. Tudi notranje napetosti v CrN-prevlekah so majhne. Prav zaradi te lastnosti je CrN-prevleka zanimiva za zaščito orodij, narejenih iz nekoliko mehkejših materialov (npr. nerjaveče jeklo, bakrove in aluminijeve zlitine), ki ne dajejo dovolj dobre opore tankim in krhkim trdim prevlekam. V teh primerih lahko uporabimo PVD CrN-prevleko debeline okrog 10 µm. Za CrN-prevleke je značilna kemijska inertnost (antiadhezijsko delovanje). Majhen koeficient trenja in kemijsko inertnost razlagajo s tvorbo stabilne oksidne tanke plasti. CrN-prevleka je predvsem primerna za zaščito orodij za hladno preoblikovanje bakra oz. bakrovih zlitin in za zaščito orodij za preoblikovanje feritnih in neferitnih materialov v toplem.

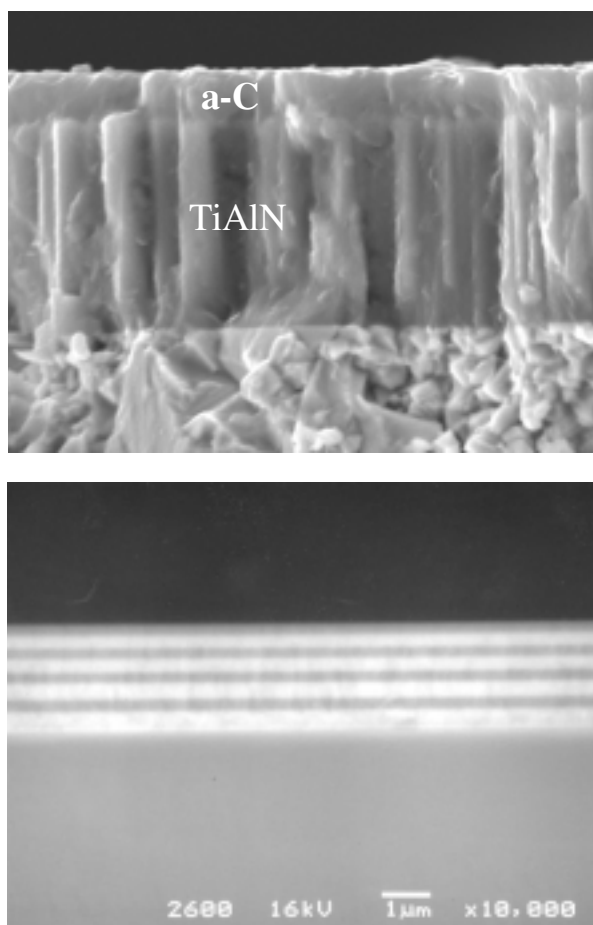
Raziskave, ki sta jih naredila podjetje Metaplas (Bergisch Gladbach, Nemčija) in Inštitut za tehniko preoblikovanja (Ludenscheid, Nemčija) so pokazale, da je pri preoblikovanju pločevine možno bistveno zmanjšati porabo maziv (do 50 %), če orodja prekrijemo s CrN ali TiAlN trdo prevleko. Obstojnost orodij se je za različne postopke preoblikovanja pločevine v primerjavi z neprekritim povečala od 3- do 100-krat pri uporabi standarne količine maziv.

Ugotovili so tudi, da je bila obraba trna za odtiskovanje, ki je bil prekrit s TiAlN-prevleko, manjša od tiste, pri kateri je bil trn prekrit s CrN. Pač pa so bile vlečne matrice, prekrute s CrN-prevleko, obstojnejše od tistih, zaščitene s TiAlN-prevleko.

TiCN-prevleka

V TiCN-prevleki je del dušikovih atomov zamenjan z večjimi ogljikovimi. Pri tej delni substituciji intersticijskih atomov se ohrani kubična ploskovno centrirana kristalna struktura, vendar pa se bistveno poveča trdota, kar je posledica deformacije kristalne strukture TiN. Prevleka TiCN je temperaturno stabilna

samo do 350 °C. Ker je zelo trda, je predvsem primerna za zaščito pestičev za preoblikovanje zelo žilavih materialov.



Slika 6: SEM-posnetek TiAlN-prevleke, prekrivane s tanko plastjo amorfnega ogljika (zgoraj) in trda prevleka v obliki večplastne strukture TiAlN/CrN (spodaj). Obe vrsti prevlek sta bili narejeni v Odseku za tanke plasti in površine na Institutu "Jožef Stefan".

TiAlN-prevleka

V TiAlN-prevleki je del titanovih atomov zamenjan z manjšimi aluminijevimi. Iz istega razloga kot v primeru TiCN se tudi pri TiAlN-prevleki trdota bistveno poveča. Vendar je TiAlN-prevleka temperaturno veliko bolj stabilna kot TiCN in v tem pogledu primernejša za zaščito orodij za hladno preoblikovanje. Na površini TiAlN-prevleke se pri povišani temperaturi tvori pasivacijska oksidna plast, ki ima majhno toplotno prevodnost in preprečuje prenos toplote v orodje.

TiAlN/a-C prevleka

Še bolj kot enojna plast (Ti,Al)N se za zaščito orodij za preoblikovanje obnese kombinacija trde prevleke (npr. (Ti,Al)N) in tanke plasti trdega maziva (npr. a-C, WC/C, MoS₂, DLC) (slika 6). 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 prevlekah, ki so bile pripravljene s postopkom nanašanja s katodnim lokom. V teh porah je mazivo vse do izrabe trde prevleke.

Večplastna in nanostrukturalna (TiAlN/TiN)-prevleka

To je večplastna struktura, narejena iz nekaj deset tankih plasti TiAlN in TiN (slika 6), ki si izmenično sledita. Večplastna struktura je lahko narejena iz nekaj deset tankih plasti ali pa več sto (nanorešetke). V teh t. i. **nanorešetkah** se stebričasta kristalna zrna obeh faz, ki imata podobno kristalno strukturo, raztezajo čez celo debelino prevleke, značilne debeline posa-

Tabela 2: PVD-prevleke, ki jih podjetje Balzers priporoča za zaščito orodij za hladno in toplo preoblikovanje ⁽⁵⁾

Material	Preoblikovanje pločevine	Masivno preoblikovanje	Preoblikovanje v toplem	Štancanje
Nelegirano jeklo	TiCN, n-(TiAlN/TiN)	TiCN, n-(TiAlN/TiN)	CrN	TiCN
Jeklo <500 N/mm ²	TiCN, n-(TiAlN/TiN)	TiCN, n-(TiAlN/TiN)	CrN	TiCN, n-(TiAlN/TiN) + WC/C
Jeklo >500 N/mm ²	TiCN, n-(TiAlN/TiN) + WC/C	TiCN, n-(TiAlN/TiN) + WC/C	CrN	TiCN, n-(TiAlN/TiN) + WC/C
Nerjaveče jeklo	TiCN, n-(TiAlN/TiN) + WC/C	TiCN	CrN	TiCN
Čisti aluminij	TiCN, WC/C, n-(TiAlN/TiN) + WC/C	TiCN, WC/C, n-(TiAlN/TiN) + WC/C	CrN	TiCN, WC/C, n-(TiAlN/TiN) + WC/C
Kovan aluminij	TiCN, WC/C	TiCN, WC/C	CrN	TiCN, WC/C
Čisti baker	TiCN, CrN, n-(TiAlN/TiN) + WC/C	CrN	CrN	CrN, n-(TiAlN/TiN) + WC/C
Medenina	TiCN		CrN	TiCN
Bronza			CrN	TiCN
TiAl6V4			CrN	
Pocinkana pločevina	TiCN, WC/C, n-(TiAlN/TiN) + WC/C			TiCN, WC/C, n-(TiAlN/TiN) + WC/C

meznih plasti pa so v področju 5-25 nm. Lastnosti nanorešetk so bistveno odvisne od procesov na faznih mejah. Prve nanorešetke so bile narejene iz tankih plasti TiN in VN (TiN/VN) ter TiN in NbN (TiN/NbN). V primerjavi z enojno plastjo TiN, VN ali NbN je mikrotrdota nanorešetke TiN/VN oz. TiN/NbN več kot dvakrat večja, odlikuje pa se predvsem zaradi veliko večje žilavosti. Prav zaradi velike mikrotrdote in žilavosti so takšne prevleke zelo primerne za zaščito orodij za hladno preoblikovanje, še zlasti, če na površino naneseemo še tanko plast trdega maziva (npr. WC/C).

6 CVD-PREVLEKE ZA ZAŠČITO ORODIJ ZA HLADNO PREOBLIKOVANJE

Vse CVD-prevleke, ki se uporabljajo za zaščito orodij, so narejene na osnovi titanovih spojin (TiC, TiN, TiCN). Prevleke pripravimo v obliki enojne plasti ali večplastne strukture (do 5 plasti). CVD-postopek je zlasti primeren:

- za zaščito matric za hladno preoblikovanje in matric za globoki vlek, kadar je debelina pločevine večja od 2 mm
- za zaščito orodij, s katerimi preoblikujemo pločevino z natezno trdnostjo nad 450 N/mm² in debelino več kot 0,8 mm
- za zaščito orodij za preoblikovanje nerjaveče pločevine
- kadar ni dovoljena uporaba maziv
- za preoblikovanje galvansko oz. elektrokemijsko obdelane pločevine
- za zaščito orodij pri procesih preoblikovanja, kjer se površina obeh delov orodja (matrica, pestič) segreje.

Večplastna CVD-prevleka TiC/TiCN/TiN debeline 6–9 µm, je zlasti primerna za hladno preoblikovanje materialov, ki so nagnjeni k adhezijskemu hladnemu navarjanju (avstenitna jekla, pocinkana pločevina). TiC-prevleka, ki je trša, se uporablja tudi za preoblikovanje bolj abrazivnih materialov, npr. pri globokem vleku debele pločevine in za zaščito orodij za hladno preoblikovanje aluminija.

7 PACVD TiN TRDE PREVLEKE Z VSEBNOSTJO KLORA NAD 3 %

Pri nanašanju TiN s PACVD-metodo se v plast vgradi tudi manjša količina klora, ki nastane med razgradnjo par TiCl₄ (izhodna snov pri pripravi TiN-prevleke)⁽⁵⁾. Za TiN-prevleko, ki jo pripravimo s PVD- in CVD-postopkoma, je značilen koeficient trenja med 0,4 in 0,8, glede na jeklo, medtem ko je pri TiN, narejenem s PACVD-postopkom, koeficient trenja okrog 0,17. Če je količina klora z atomskim deležem pod 3,2 %, se mehanske lastnosti TiN-prevleke (mikrotrdota, Youngov modul) ne spremenijo znatno.

Pri večjih koncentracijah se tako mikrotrdota kot Youngov modul zmanjšata. Pač pa se z naraščajočo vsebnostjo klora zmanjšuje povprečna velikost kristalnih zrn in posledično hrapavost, hkrati pa se spremeni način rasti: preferenčna rast kristalnih zrn (100) se spremeni v naključno. Če je koncentracija klora nad 3,2 at.%, le-ta segregira na mejah kristalnih zrn. Ta klor potem z vlago iz okolice tvori mazalno plast, ki je odgovorna za zmanjšanje koeficienta trenja.

8 SKLEPI

V zadnjih dveh desetletjih, odkar so se pojavile, so PVD trde prevleke postale nepogrešljive pri zaščiti orodij. PVD-postopki omogočajo pripravo zelo širokega spektra trdih prevlek, od katerih največ obetajo nanostrukturne (nanorešetke, nanokopozitne, nanogradientne) in druge supertrde prevleke (diamantne, c-BN, CN). Še večjo perspektivo imajo trde prevleke z majhnim koeficientom trenja. Nekatere od njih se že uporabljajo kot suha maziva za zaščito orodij za hladno preoblikovanje kot tudi za zaščito različnih sestavnih delov avtomobilskega motorja.

9 LITERATURA

- ¹C. Donnet, A. Erdemir, Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings, *Surf. Coat. Technol.* 180–181 (2004), 76–84
- ²M. Remškar, A. Mrzel, Z. Škraba, J. Demšar, A. Jesih, M. Čeh, D. Mihailović, P. Stadelmann, F. Levy, *Science*, **292** (2001), 5516
- ³T.V. Kononenko, S.V. Garnov, S.M. Pimenov, V.I. Konov, V. Romano, B. Borsos, H.P. Weber, Laser ablation and micropatterning of thin TiN coatings, *Appl. Phys. A* **71** (2000), 627-631
- ⁴M. Čekada, P. Panjan, Diamantu podobne ogljikove (DLC) plasti, *Vakuumist*, **22**, **4** (2002), 14-16
- ⁵<http://www.sputtek.com/papre1999013230a.htm>