

TRIBOLOŠKE LASTNOSTI TRDIH ZAŠČITNIH PREVLEK

Peter Panjan, Miha Čekada

Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

POVZETEK

Različni postopki plazemskega inženirstva površin se danes uporabljajo za izboljšanje triboloških lastnosti orodij in strojnih delov. Katero prevleko izberemo za zaščito le-teh, je odvisno od triboloških razmer in prevladujočih mehanizmov obrabe v izbranem primeru njihove uporabe. V tem prispevku opisujemo osnovne mehanizme obrabe in tiste fizikalne lastnosti trdih prevlek, ki so pomembne s tribološkega vidika.

Tribological properties of hard coatings

ABSTRACT

Today various plasma surface engineering techniques are used to improve the tribological properties of tools and components. The protective coating should be selected to match the tribological situation and the life limiting surface damage mechanisms on the intended application. In this paper the basic wear mechanisms are described as well as the physical properties of hard coatings relevant from tribological point of view.

1 UVOD

Orodja in strojni deli se obrabljajo zaradi lomov, abrazije, zvarjanja in trganja delcev, mehanskega in termičnega utrujanja materiala, difuzijskih pojavov in oksidacije.

Različne oblike obrabe so skupaj s korozijo in utrujanjem materiala glavni omejujoči faktor pri uporabi orodij in strojnih delov. Obraba ni snovna lastnost materiala orodja oz. strojnega dela, ampak je lastnost tribološkega sistema. Vsaka sprememba obremenitve, hitrosti ali vplivov iz okolja povzroči spremembe v hitrosti obrabe na eni ali obeh komponentah tribološkega sistema. Metoda zaščite orodja oz. strojnega dela je odvisna od natančne določitve tribološkega problema, zato moramo biti zelo pazljivi pri uporabi splošnih napotkov pri reševanju specifičnih problemov.

Metode za izboljšanje obrabne obstojnosti površin orodij in strojnih delov lahko v splošnem delimo v dve skupini:

1. Difuzijske metode, s katerimi spremenimo sestavo površinske plasti orodja oz. strojnega dela. Difuzijske metode so lahko:
 - termične (indukcijsko utrjevanje, utrjevanje s plamenom, lasersko utrjevanje, plazemsko utrjevanje)
 - termokemijske (ogljíčenje, karbonitriranje, nitriranje, boriranje)
 - ionska implantacija
2. Metode, ki omogočajo nanos obrabno obstojne prevleke na površino orodja oz. strojnega dela. V praksi se uporabljajo:

- elektrokemijski nanos (npr. trdo kromanje)
- plazemski elektrokemijski nanos (npr. nanos tanke plasti korunda z anodno oksidacijo)
- kemijski nanos (npr. netokovni nanos trdega niklja, postopek Toyota)
- termični pršilni postopki (plamenski, elektroobločni, plazemski)
- kemijski postopki nanašanja iz parne faze (CVD)
- kemijski postopki nanašanja v nizekotlačni plazmi (PACVD)
- fizikalni (vakuumski) postopki (PVD) nanašanja (naparevanje, naprševanje, ionsko prekrivanje).

Čeprav je glavni pomen zaščitnih prevlek povečati obstojnost orodja oz. strojnega dela, ima prevleka še nekatere druge pozitivne učinke:

- a) **izboljšanje obrabne obstojnosti** omogoča večje rezalne hitrosti in posledično večjo produktivnost, ki je pogosto pomembnejša od večje obstojnosti orodja;
- b) **zmanjšanje trenja**, kar pomeni manjšo porabo energije; v nekaterih primerih se lahko odpovemo mazanju ali hlajenju;
- c) **zmanjšanje navarjanja**, kar je ključnega pomena pri zaščiti orodij za hladno preoblikovanje;
- d) z zaščitno prevleko lahko izboljšamo tribološke lastnosti aluminijevih, titanovih in drugih zlitin lahkih kovin, s katerimi nadomestimo konvencionalne materiale (npr. konstrukcijsko jeklo).

2 MEHANIZMI OBRABE ORODIJ IN STROJNIH DELOV

V praksi razlikujemo različne tribološke kontakte dveh površin trdnih teles, ki so v medsebojnem gibanju: razenje, abrazija, erozija, drsenje, valjanje⁽¹⁻⁷⁾. Za vsakega od njih so značilne obremenitve in posledično trenje ter mehanizmi obrabe. V splošnem velja, da majhnemu trenju ustreza majhna obraba in velikemu trenju velika. Značilne poškodbe zaščitnih prevlek so predvsem luščenje (adhezijska poškodba) in razpokanje (kohezijska poškodba). Sicer pa se v tribologiji srečujemo z poškodbami, ki jih lahko razvrstimo v tri kategorije:

i) poškodbe brez izmenjave materiala

V tem primeru se srečujemo z permanetno spremembo geometrije in/ali topografije obdelovanca, kot so npr. raze ali razpoke (ključni parametri so trdota in Youngov modul prevleke in podlage ter žilavost

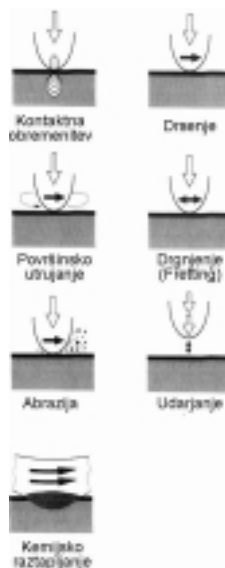
prevleke; trdota prevleke odločilno vpliva na odpornost prevleke na razenje, medtem ko je žilavost prevleke odgovorna za odpornost le-te na širjenje razpok)

ii) poškodbe z odzemanjem materiala (obraba)

Obrabna odpornost prekritega orodja je predvsem odvisna od prevleke; obraba je posledica luščenja prevleke (adhezijska obraba) ali odstranjevanja le-te zaradi erozije, abrazije, kemijskega raztapljanja itd.

iii) poškodbe zaradi navarjanja materiala obdelovanca

Material obdelovanca, ki se nalepi na površino orodja, povzroči nastanek odtisov (vdrtin) in raz na površini izdelka. Nalepljanje se lahko zmanjša s pripravo gladke površine orodja oz. strojnega dela in z nanosom prevleke, ki ima majhno kemijsko afiniteto do materiala obdelovanca.

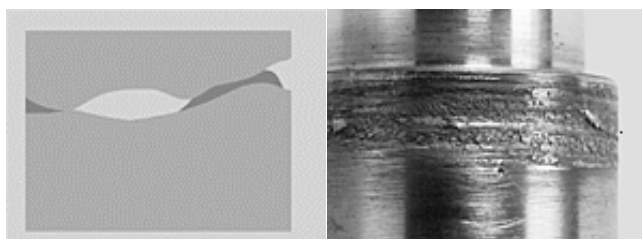


Slika 1: Shematski prikaz triboloških kontaktov

Glavni mehanizmi obrabe so: adhezijska, abrazijska in kemijska obraba ter obraba zaradi utrujanja materiala. V večini triboloških kontaktov hkrati deluje več mehanizmov obrabe.

a) Adhezijska obraba

Kadar se stakneta vršička dveh površin trdnih snovi, lahko pride do nastanka hladnega zvara. Pri

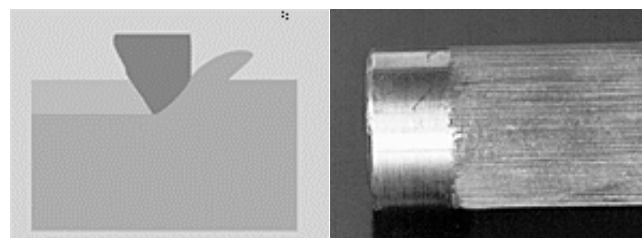


Slika 2: Shematski prikaz adhezijske obrabe in poškodba strojnega dela zaradi tovrstne obrabe ⁽⁸⁾

relativnem tangencialnem gibanju površin se odtrga del mehkejšega materiala. Na adhezijsko obrabo znatno vplivajo tanke zaščitne plasti in različni kontaminanti. V posebnih primerih, kot je drsenje stičnih ploskev v vakuumu (vesoljska plovila) ali inertni atmosferi, ali kadar so lokalne temperature na vršičkih zelo visoke, je adhezijska obraba dominanten mehanizem obrabe.

b) Abrazijska obraba

Abrazijska obraba se pojavi, kadar je material ene stične površine trši od druge (zaradi hrapavosti in valovitosti površine kontaktnih materialov pride do plastične deformacije mehkejšega materiala) ali kadar se na stiku pojavijo trdi delci. Delci tršega materiala se odtisnejo v mehkejšo snov, kar povzroči plastično deformacijo mehkejše snovi. Pri tangencialnem gibanju trše snovi pride do pluzenja, zato na površini mehkejšega materiala nastanejo brazde in raze).



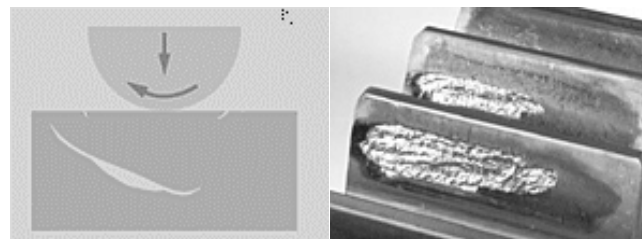
Slika 3: Shematski prikaz abrazijske obrabe in poškodba strojnega dela zaradi tovrstne obrabe ⁽⁸⁾

c) Erozijska obraba

Erozija površine orodja ali strojnega dela se pojavi, če njihovo površino zadane curek hitrih trdih delcev, drobnih kapljic ali plina. Odziv materiala podlage je odvisen od njegovih lastnosti in predhodne obdelave ter od vrste erozijskih delcev, njihove hitrosti, velikosti in vpadnega kota. Z erozijsko obrabo se srečujemo predvsem pri orodjih za tlačni liv kovin in orodjih za brizganje plastike. Trda prevleka je erozijsko tem bolj obstojna, čim bolj je trda in žilava.

č) Obraba zaradi utrujanja

Med dolgotrajnim obremenjevanjem in razbremenjevanjem površine pride do združevanja dislokacij in por (utrujanje materiala), zaradi česar se pojavijo

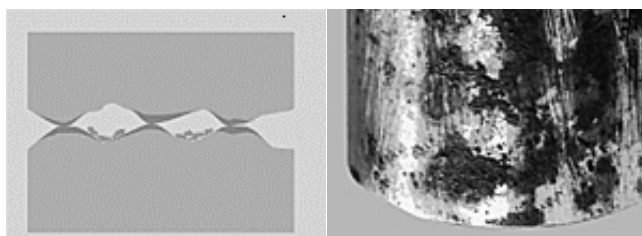


Slika 4: Shematski prikaz obrabe zaradi utrujanja in poškodba strojnega dela zaradi tovrstne obrabe ⁽⁸⁾

razpoke. Pri tem se koščki materiala odtrgajo. Obraba površine zaradi utrujanja je najpogostejši mehanizem obrabe ležajev in zobnikov. Na podoben način se na drsnih površinah pojavi delaminacijska obraba. Ta je posledica ponavljajočega drsenja vršičkov na eni od površin v tribološkem kontaktu. Pri tem pride do nukleacije majhnih razpok pod površino.

d) Kemijska obraba

Najpogostejša oblika kemijske obrabe je oksidacija. Oksidacijska plast ima funkcijo zaščite, ki bistveno zmanjša tako trenje kot obrabo. Vendar se ta plast zaradi razenja nepretrgoma odstranjuje. Pri rezalnih procesih zelo vroč odrezek drsi ob prosti površini orodja. Temperatura na stični površini lahko preseže 700 °C, zato je površina odrezka delno staljena. V takšnih okoliščinah pride do difuzije ali raztapljanja orodnega materiala v materialu odrezka, kar povzroči poškodbe na delovni površini orodja.



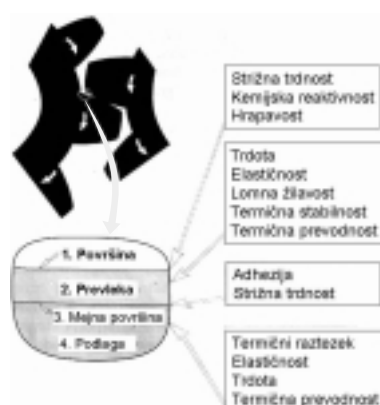
Slika 5: Shematski prikaz kemijske obrabe in poškodba strojnega dela zaradi tovrstne obrabe ⁽⁸⁾

3 LASTNOSTI TRIBOLOŠKIH PREVLEK

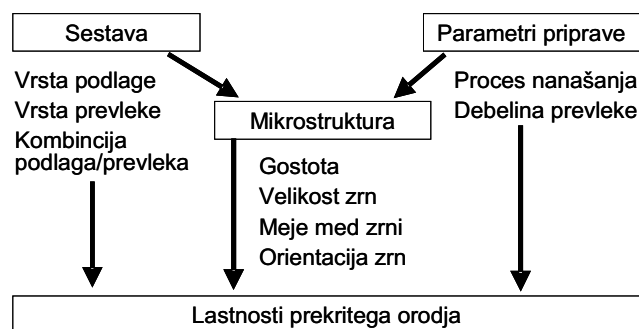
Ključni zahtevi glede izbire tribološkega sistema (material podlage orodja oz. strojnega dela / zaščitna prevleka) sta povezani glede na:

- 1) obrabno obstojnost in
- 2) trenje

Da bi zadostili tem dvem funkcijskim zahtevam, moramo najprej zagotoviti zadostno adhezijo prevleke na podlago in nosilnost kompozita plast–podlaga.



Slika 6: Shema tribološkega sistema in ključne lastnosti podlage, prevleke in površine, ki odločilno vplivajo na obrabo orodja oz. strojnega dela ⁽⁷⁾



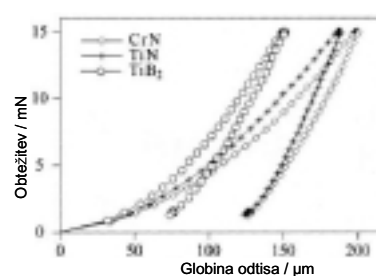
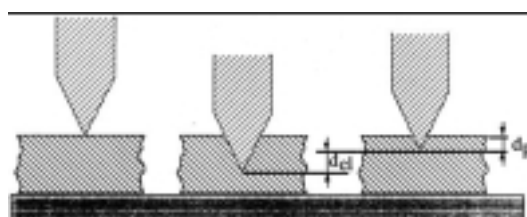
Slika 7: Parametri zaščitne prevleke, ki vplivajo na tribološke lastnosti prevleke

Nosilnost kompozita plast–podlaga je sposobnost le-tega, da med delovanjem triboloških obremenitev ne pride do plastične deformacije podlage ali poškodb prevleke, kot so luščenje in razpokanje.

S tribološkega vidika so ključne naslednje lastnosti trdih prevlek:

a) trdota

Pravzaprav je pomembno razmerje med trdoto prevleke in trdoto podlage. Kadar nanesemo mehko prevleko (npr. MoS₂, DLC, WC/C), znižamo trenje in



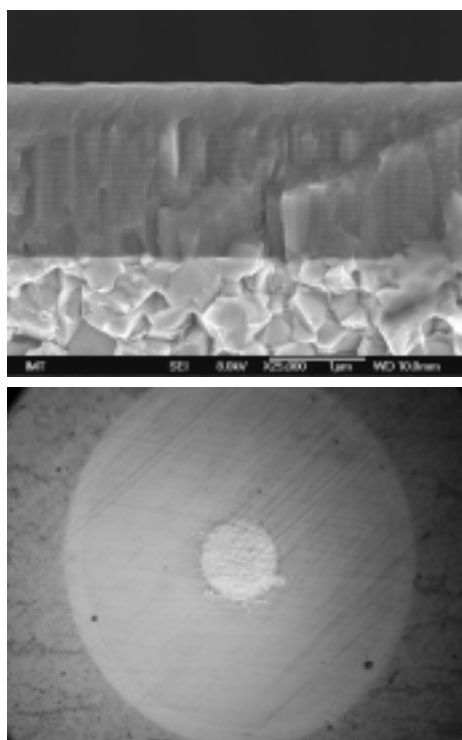
Slika 8: Merilnik mikrotrdote Fischerscope H100C (zgoraj) in meritev globine odtisa v odvisnosti od obtežitve med obremenjevanjem in razbremenjevanjem (spodaj) ter shematski prikaz odtiskovanja (sredina); d_{el} –globina odtisa zaradi elastične deformacije, d_{pl} –globina odtisa zaradi plastične deformacije ⁽⁵⁾

natezne napetosti na stiku s podlago, ki pospešujejo nastajanje in širjenje razpok. Trda prevleka (TiN, TiAlN), ki jo nanese na relativno mehko podlago, pa zmanjša abrazijsko obrabo. Trdoto prevleke najpogosteje merimo po metodi Vickers, tako da naredimo odtis z diamantno konico pri statični obtežitvi le-te z maso od 25 do 50 g. Iz diagonale odtisa, ki jo izmerimo pod optičnim mikroskopom, izračunamo trdoto po Vickersu. Primernejši je postopek merjenja trdote pri dinamičnem obremenjevanju konice in merjenju globine odtisa med obremenjevanjem in razbremenjevanjem konice.

b) debelina

Debelina prevleke mora biti tolikšna, da je nosilnost kompozita prevleka–podlaga zadovoljiva, saj se pod vplivom obremenitev prevleka skupaj s podlago plastično deformira. Upogibne napetosti, ki pri tem nastanejo v podlagi, so lahko tolikšne, da presežejo kritične vrednosti, zato pride do nastanka in širjenja razpok. Nanos debelih PVD-prevlek je povezan z nastankom velikih tlačnih napetosti, ki linearno naraščajo z debelino prevleke. Velike tlačne napetosti povzročijo luščenje prevleke. Hkrati je pri enakem upogibu debelejša prevleka izpostavljena večjim upogibnim napetostim kot tanka. Nastale razpoke zato hitreje presežejo kritično vrednost za porušitev.

Debelino prevleke kontroliramo najpogosteje tako, da naredimo krogelni obrus z jekleno kroglico, na-



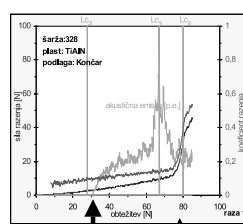
Slika 9: SEM-posnetek (zgoraj) preloma prevleke TiAlN/TiN, nanese na Centru za trde prevleke na IJS; krogelni obrus skozi isto prevleko (spodaj)

mazano s fino diamantno pasto. Iz premera kolobarja, ki ustreza prevleki, lahko izračunamo debelino le-te. Debelino lahko določimo na prelomu ali metalografskem obrusu, ki ga poslikamo z vrstičnim elektronskim mikroskopom. Pri poskusnem vzorcu, ki ga med nanašanjem delno zastremo, lahko s profilometrom izmerimo višino stopnice, ki ustreza debelini prevleke.

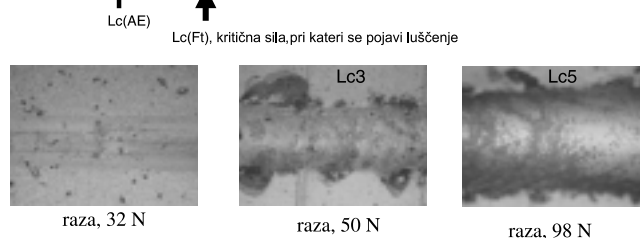
c) adhezija

Dobra adhezija zaščitne prevleke je prvi pogoj za njihovo uspešno uporabo. Zagotovimo jo lahko z ustrezno predpripravo površine orodja oz. strojnega dela, ki vključuje peskanje, kemijsko čiščenje, degazacijo v vakuumu in ionsko jedkanje. Adhezijo izboljšamo z nanosom tanke vmesne plasti, ki zagotovi kemijsko vezavo na podlago, npr. tanka plast titana pri 450 °C reagira z ogljikom iz orodnega jekla; nastala karbidna zrna delujejo kot sidra. Izboljšamo jo tudi z ionskim obstreljevanjem med samim nanašanjem prevleke, saj visokoenergijski delci iz plazme omogočijo nastanek psevdodifuzijske cone.

Adhezijo trdih prevlek merimo s preskusom razenja. Preskus razenja temelji na razenju površine vzorca z diamantno konico, ki ima Rockwellov profil (radij 200 μm). Med razenjem linearno povečujemo obtežitev le-te in merimo silo razenja, pri kateri se pojavijo značilne poškodbe prevleke. Nastanek prvih razpok zaznamo z merilnikom akustične emisije, medtem ko delno in totalno delaminacijo prevleke registriramo preko merjenja sile razenja, ki se skokovito poveča, ko se plast odtrga. Poškodbe prevleke opazujemo tudi z optičnim mikroskopom. V primeru drsnih kontaktov v splošnem velja, da mora biti kritična sila več kot 30 N, medtem ko se zahteva za HSS-orodja, da je ta sila vsaj 60–70 N. Kritična sila za totalno delaminacijo narašča s trdoto podlage in debelino prevleke in pada z naraščajočo hrapavostjo.



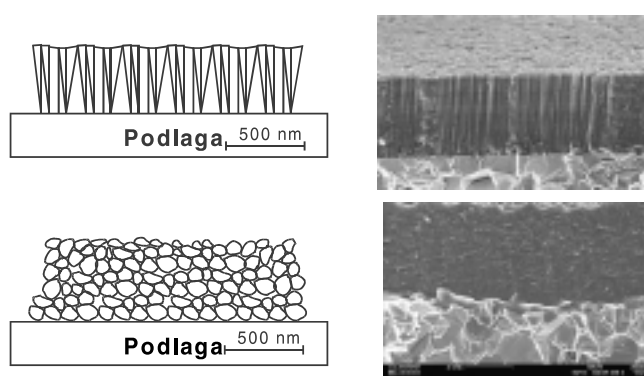
- Lc (AE): pojav akustične emisije
- Lc (F): skokovito povečanje sile razenja
- Lc₃: trganje plasti ob robu raze
- Lc₄: delno luščenje (delaminacija)
- Lc₅: popolno luščenje (delaminacija)



Slika 10: Akustična emisija in sila razenja v odvisnosti od obtežitve diamantne konice med preskusom razenja (zgoraj) in posnetki poškodb raze, narejeni z optičnim mikroskopom (spodaj)

č) mikrostruktura in morfologija

Mikrostruktura bistveno vpliva na mehanske lastnosti prevleke (trdoto, notranje napetosti). Prevlaka s finostrukturno mikrostrukturno ima večjo trdoto od tiste z grobostrukturno strukturo. Morfologijo prevleke določajo parametri nanašanja. V odvisnosti od parametrov nanašanja je plast lahko kristalinična, delno orientirana, amorfna ali nanokristalinična. Morfologija prevleke ima velik vpliv tudi na hrapavost le-te in posledično na trenje. Morfologijo prevlek lahko opazujemo z mikroskopom na atomsko silo, vrstičnim mikroskopom ali profilometrom. Mikrostrukturno prevleke pa lahko slikamo z vrstičnim mikroskopom na prelomu prevleke, ali s presevnim mikroskopom po zahtevni pripravi vzorca.

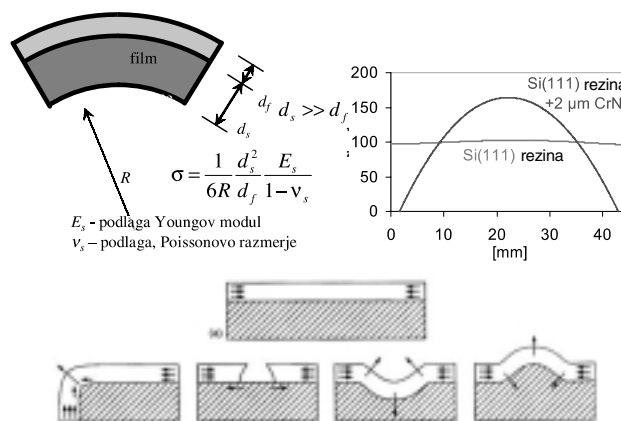


Slika 11: Shematski prikaz stebričaste (zgoraj) in finostrukturne (spodaj) mikrostrukture trdih prevlek in odgovarjajoči SEM-posnetki

d) notranje napetosti

Zaradi same narave priprave so v PVD–prevlekeh visoke tlačne napetosti. Le-te nastanejo zaradi strukturnega neujemanja materiala prevleke in podlage na tistih mestih, kjer se pojavi epitaksialna nukleacija in rast prevleke. Napetosti so tudi posledica ionskega obstreljevanja prevleke med njeno rastjo (z obstreljevanjem izboljšamo adhezijo in mikrostrukturno prevleke). Napetosti se pojavijo tudi med ohlajanjem po nanosu prevleke, zaradi različnih termičnih raztezkov materiala prevleke in podlage. V nekaterih primerih pride med ohlajanjem tudi do faznih transformacij, ki prav tako povzročijo nastanek notranjih napetosti. Tlačne napetosti v splošnem izboljšajo obrabno obstojnost trdih prevlek, kadar so površine orodij gladke. Na napravnostih (vršički, kotanje), ki se nahajajo na hrapavih površinah, pa tlačne napetosti inducirajo natezne in strižne sile, ki pospešujejo širjenje razpok. K tlačnim napetostim moramo seveda dodati statične zunanje obremenitve. Vsota obeh pogosto na mestih nepravilnosti preseže adhezijske sile, zato se prevleka odlušči.

Notranje napetosti lahko izmerimo tako, da s profilometrom izmerimo ukrivljenost relativno tanke



Slika 12: Merjenje notranjih napetosti iz ukrivljenosti podlage (zgoraj) in napetostno polje na mestih nehomogenosti in napak na površini ter robovih (spodaj)

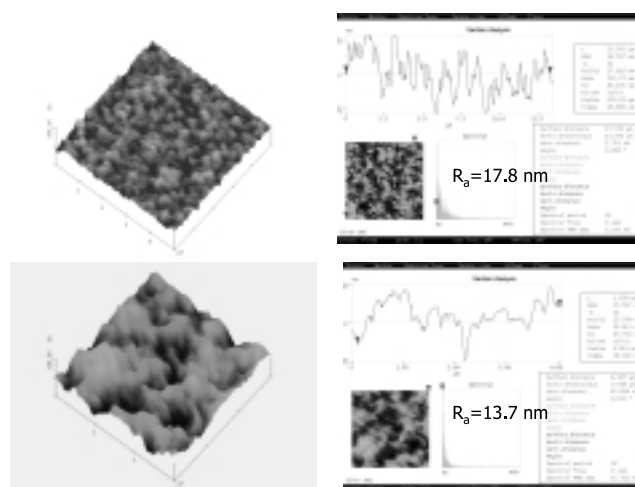
podlage po nanosu trde prevleke. Ukrivljenost lahko izmerimo med samim postopkom nanašanja prevleke tudi z laserskim žarkom. Notranje napetosti lahko določimo tudi iz rentgenskih uklonskih spektrov.

e) hrapavost

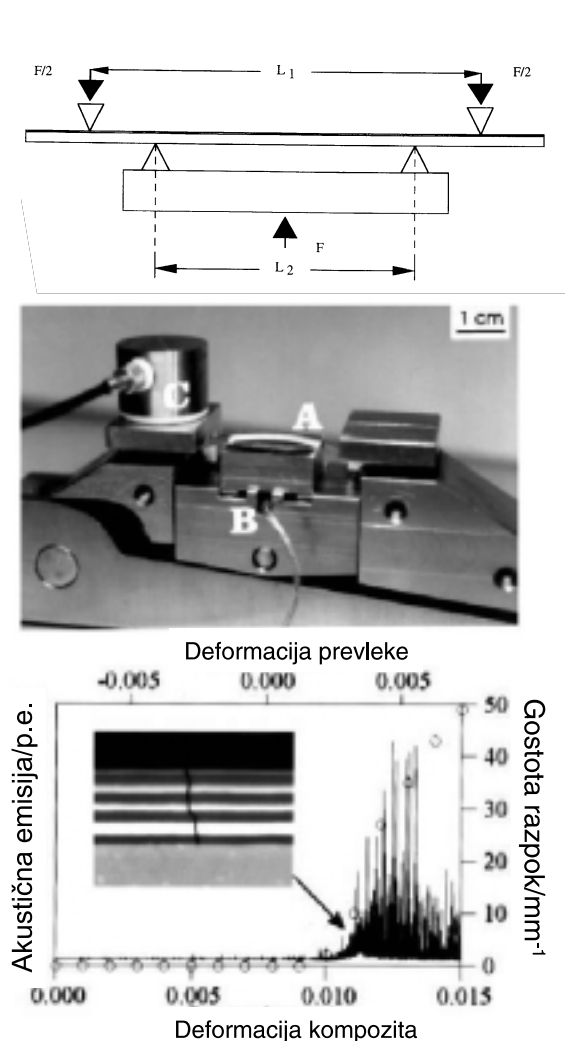
V odvisnosti od postopka nanašanja trde zaščitne prevleke lahko hrapavost površine ostane nespremenjena ali pa se poveča. V tribološkem sistemu, kjer drsita dve hrapavi površini, zelo trdi vršički površine oplemenitenega orodja oz. strojnega dela razijo po površini obdelovanca oz. komponente, kar povzroči povečano trenje in obrabo. Hrapavost površine seveda zmanjša stično površino in zato poveča tlak, ki lahko na posameznih mestih nekajkrat preseže nominalne vrednosti Hertzovega stičnega tlaka. Hrapavost lahko izmerimo s profilometrom ali z mikroskopom na atomsko silo. Slednji ima atomsko ločljivost.

f) žilavost

Razpokanje in luščenje sta najpogosteji poškodbi PVD- in CVD-prevlek. Zelo pomembno je, da se



Slika 13: Topografija in hrapavost TiAlN–prevleke na fino brušeni podlagi iz karbidne trdine

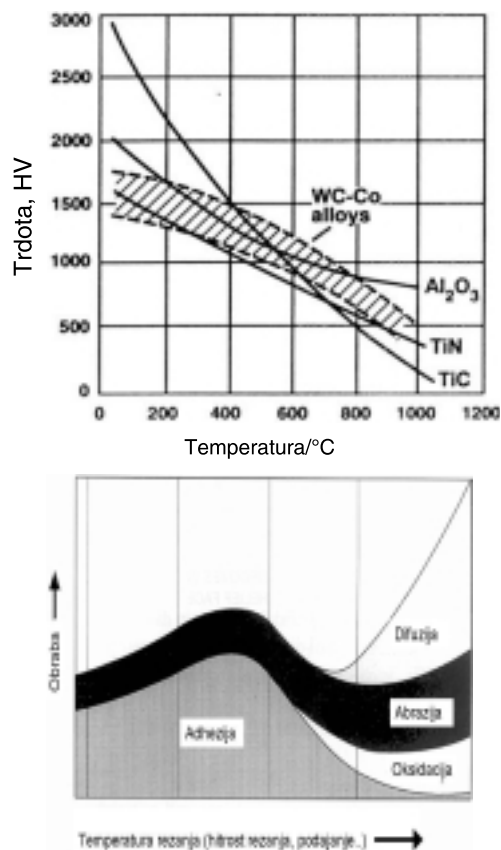


Slika 14: Merjenje žilavosti trdih prevlek z upogibnim preskusom ⁽⁵⁾

prevleka prilagodi tlačnim ali nateznim napetostim, ne da bi pri tem prišlo do nastanka in širjenja razpok. Parameter, ki določa odpornost prevleke na širjenje razpok in delaminacijo, je elastični (Youngov) modul, ki mora biti čim manjši. Čeprav se velika trdota in žilavost v splošnem izključujeta, je v primeru trdih prevlek možno doseči hratno povečanje obeh. Tak primer so nanokompozitne in večplastne strukture. Vsaka razpoka se začne z nateznimi napetostmi, ki se v prevleki pojavijo, potem ko se med statičnim obremenjevanjem najprej kompenzirajo tlačne notranje napetosti. Tlačne notranje napetosti zato povečajo lomno žilavost prevleke. Žilavost prevlek merimo z upogibnim preskusom tako, da med upogibanjem z elektronskim mikroskopom opazujemo, pri kolikšni sili se pojavijo prve razpoke. Pojav prve razpoke lahko zaznamo tudi z akustičnim detektorjem.

g) velika trdota pri povišani temperaturi

Pogosto je pomembno (zlasti pri visokohitrostni obdelavi), da trda prevleka ohrani visoko trdoto tudi pri povišanih temperaturah. Čeprav se mnoge od njih



Slika 15: Mikrotrdota trdih prevlek in karbidne trdine (zgoraj) ter mehanizmi obrabe v odvisnosti od temperature (spodaj) ⁽¹⁾

odlikujejo z veliko trdoto pri sobni temperaturi, se le-ta pri večini od njih pri višjih temperaturah zelo zmanjša. Še najboljše se pri pri temperaturah nad 600 °C obnese TiAlN. Termično stabilnost te prevleke lahko dodatno izboljšamo z dodatkom kovin z visokim tališčem (Hf, Ta), medem ko oksidacijsko obstojnost izboljšamo z dodatkom elementov, ki imajo visoko afiniteto do kisika (Cr, Y, Si). Pasivacijske lastnosti prevleke TiAlN so najboljše, če je vsebnost aluminija vsaj 66 %. Še najboljše se pri visokih temperaturah obnese aluminijoksidna prevleka.

h) korozijska obstojnost

V principu so keramične prevleke same po sebi korozijsko obstojne v večini korozijskih medijev. Korozijska podlage poteka skozi drobne pore v prevleki (pinhole), ki se pojavijo na tistih mestih površine orodja, kjer se v plast vgradijo prašni in drugi delci iz okolice. Na teh mikropodročjih se kasneje plast zaradi velikih notranjih napetosti odlušči. Na korozijsko obstojnost prevleke vpliva tudi njena mikrostruktura in tvorba pasivacijske plasti. Korozijsko obstojnost lahko izboljšamo, če prevleko pripravimo v obliki večplastne strukture. Korozijsko obstojnost prevlek merimo z metodo ciklične voltametrije, kjer merimo korozijski tok v odvisnosti od potenciala korozijske celice v izbranem korozijskem mediju (npr. 0,5 M raztopina NaCl).

4 SKLEP

Danes je uporaba postopkov inženirstva površin v industrijski uporabi neizogibna. Uporabljajo se vse bolj sofisticirani postopki, ki prinašajo "revolucionarne" rezultate pri utrjevanju površin, zmanjšanju trenja ter korozijski in oksidacijski obstojnosti. Za vsak tribološki sistem posebej moramo najprej ugotoviti, kateri mehanizem obrabe je dominanten in se šele na osnovi rezultatov takšne analize ali priporočil strokovnjakov odločimo za ustrezen postopek zaščite.

5 LITERATURA

- ¹Coating tribology, K. Holmberg, A. Matthews, Elsevier, Amsterdam, 1998
- ²Handbook of tribology, B. Bhushan, B.K. Gupta, McGraw-Hill, Inc. New York, 1991
- ³Handbook of physical vapor deposition (PVD) Processing, D. M. Mattox, Noyes Pub., Westwood, 1998
- ⁴Matthews, A. Leyland, Surf. Coat. Technol., **71** (1995), 88–92
- ⁵S. Hogmark, S. Jacobson, M. Larsson, Wear **246** (2000), 20–33
- ⁶K. Holmberg, A. Mathews, Thin Solid Films, **253** (1994), 173–178
- ⁷K. Holmberg, H. Ronkainen, A. Matthews, Ceramics International, **26** (2000) 787–795
- ⁸<http://www.balzers.com>