

Uporaba trdih prevlek PVD v strojništvu - možnosti in omejitve

Hard PVD Coatings in Mechanical Engineering - Perspectives and Limitations

Bojan Podgornik - Jože Vižintin

Zadnjih 20 do 30 let je bilo razvitih veliko novih trdih prevlek, kakor tudi tehnik za njihovo nanašanje. Tako smo soočeni s plazemsko podprtimi postopki nanašanja ter diamantnimi in diamantu podobnimi prevlekami, ki jih je mogoče nanašati že pri temperaturah, nižjih od 200 °C, in dajejo izjemne tribološke lastnosti. Kljub temu, da je ob odlični obrabni odpornosti mogoče doseči tudi razmeroma nizek koeficient trenja, pa je uporaba trdih zaščitnih prevlek v strojništvu še vedno bolj izjema kakor pravilo. Glavni problem pomenijo razmeroma visoki stični tlaki ter zelo zahtevno napetostno-deformacijsko polje, ki so mu strojni elementi izpostavljeni med delovanjem. Mnoge numerične in analitične raziskave so pokazale, da se pri oplášenih sistemih plastična deformacija prične v podlagi in da je zmožnost prevleke prenašati obremenitev v največji meri odvisna prav od podlage. To pomeni, da ob trdi, obrabno odporni površini, potrebujemo tudi primerno pripravljeno podlago, ki bo zmožna dati oporo trdi in s tem krhki prevleki.

Ceprav imamo neomejeno število mogočih kombinacij priprave podlage in nanosa trde zaščitne prevleke, pa moramo biti pri tem zelo pazljivi. Neprimerna kombinacija lahko, namesto zelenega izboljšanja, privede do nepričakanega poslabšanja lastnosti elementa ali naprave. Prav to je razlog, da se je v praksi uspešno uveljavilo le nekaj postopkov, izmed katerih kombinacija nitriranja v plazmi ter fizikalnega nanašanja iz faze pare kaže največji potencial za uporabo trdih prevlek v strojništvu.

© 2003 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

(Ključne besede: prevleke trde, trenje, obraba, nitriranje plazemsko)

A lot of new technologies, and thin films with very good tribological properties, like diamond and diamond-like carbon coatings, were introduced in the past 2 to 3 decades. However, the use of hard, thin films in the field of machine elements is the exception rather than the rule. The main problem lies in the relatively high contact pressure and the very complex loading of the machine components, which demand a hard resistant surface and a tough core. It was found during many numerical and experimental analyses that in the case of hard, thin films the plastic deformation of the composite starts in the substrate. Therefore, the ability of the film to sustain the loading depends principally on the load-carrying capacity of the substrate.

Although there are an almost unlimited number of possibilities, we have to be very careful when combining different surface treatments and thin-film deposition techniques. It should be pointed out that the wrong combination can very easily lead to an undesirable deterioration of the properties, either of the film or the substrate, instead of an improvement. This is why only a few combinations can be successfully used in practice. One of the most promising ones, already proven in the case of high-speed steel, is the combination of plasma nitriding of a steel substrate followed by PVD (physical vapour deposition) thin-film deposition.

© 2003 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

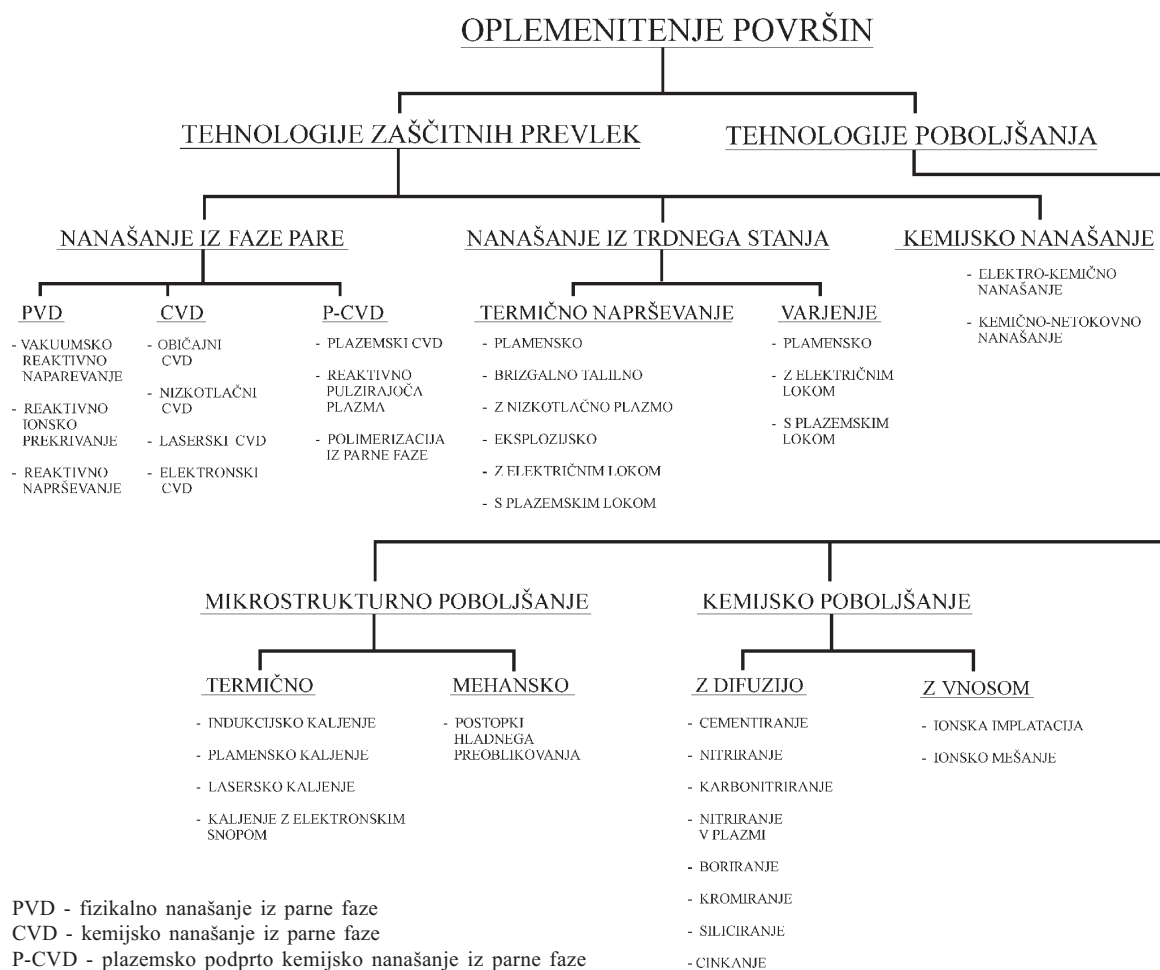
(Keywords: hard coatings, friction, wear, plasma nitriding)

0 UVOD

Za spremembo ali oplemenitenje stičnih površin in izboljšanje njihovih triboloških lastnosti imamo na razpolago najrazličnejše postopke poboljšanja ter postopke nanosa trde zaščitne prevleke. V primeru, da je na površino nanosena plast novega materiala, govorimo o postopkih nanašanja, če pa pride do spremembe mikrostrukture obstoječe

površine, pa o postopkih poboljšanja (slika 1). Lastnosti površine, kakor so zmožnost nošenja obremenitve, obrabna odpornost ter ustrezen koeficient trenja, so seveda odvisne od uporabljenega postopka oplemenitenja površine ([1] do [10]).

Izbira najprimernejšega postopka oplemenitenja površine je odvisna od mnogih dejavnikov, pri čemer so najpomembnejši delovne zahteve, izbrani osnovni material, parametri oplemenitenja površine ter zahtevane



Sl. 1. Tehnologije oplemenitenja površin

lastnosti površine ([5], [7], [11] in [12]). V prvi vrsti morajo biti postopki oplemenitenja ali spremembe površine združljivi z izbranim osnovnim materialom elementa. To pomeni, da sta poleg trdote površine najpomembnejša parametra za izbiro postopka oplemenitenja površine temperatura oplemenitenja ter debelina modificirane oziroma nanosene plasti. Trdota oplemenitenih površin se giblje od 250 do 350 HV za toplotno napršene prevleke, do 1000 HV za nitrirana in cementirana jekla, vse do 3500 HV pri trdih keramičnih prevlekah, nanosenih iz faze pare (CVD in PVD), medtem ko diamantne in diamantu podobne prevleke dosegajo celo trdoto naravnega diamanta. Debeline plasti so v območju od nanometra do milimetra, temperature oplemenitenja pa med 20 °C in 1000 °C ([6] in [10]).

Za doseganje želenih triboloških lastnosti morajo oplemenitenne površine združevati ustrezno kombinacijo lastnosti; primerno trdoto, žilavost, toplotno razteznost, adhezijo, koeficient trenja itn. Kljub velikemu razponu razpoložljivih materialov in tehnik oplemenitenja se je izkazalo, da preprosto in z uporabo posameznih postopkov oplemenitenja vseh teh lastnosti ni mogoče doseči hkrati. To spoznanje in vse večje zahteve industrije po uporabi lahkih in cenjenih osnovnih materialov je vodilo do razvoja

novih zamisli oplemenitenja površine (večkomponentne in večplastne prevleke ter kombinacija kemotoplotne priprave podlage in nanosa trdih prevlek, znana tudi kot tehnologija “duplex”) ([7] do [9], [13] do [15]). Poglavitna zamisel vseh zasnovkov oplemenitenja površine je povečanje odpornosti in optimizacija mikrostrukture kompozita, s čimer je mogoče doseči ustrezne lastnosti tako na površini kakor tudi v podlagi.

Izbira ustreznega postopka oplemenitenja površine je že sama po sebi zelo zahtevna naloga. Z združevanjem različnih tehnik oplemenitenja površine se zahtevnost izbire še precej poveča. Tako izbira ustrezne priprave podlage in nanosa trde zaščitne prevleke terja celovito poznavanje prednosti in pomanjkljivosti posameznih tehnologij oplemenitenja ter možnosti njihove kombinacije. Na drugi strani je končna odločitev o načinu oplemenitenja površine vedno kompromis med tehnološkimi in gospodarskimi zahtevami.

1 Tribološki stik

O tribološkem stiku govorimo, kadar imamo v stiku dve površini, ki se medsebojno relativno

gibljeta. S časom pride znotraj tribološkega stika do spremembe geometrijske oblike in materialnih lastnosti stičnih površin, kar se kaže v energijsko povezanih izhodnih veličinah; trenje, obraba, povišana temperatura, nihanja itn. [15]. Kot tak je tribološki stik zelo zahteven, še posebej ker hkrati vključuje spremembe, tako na makro kakor tudi na mikro nivoju, tribokemijske spremembe in prenos materiala.

V primeru površin prekritih s trdimi prevlekami, je njihovo tribološko obnašanje odvisno od štirih parametrov, to so:

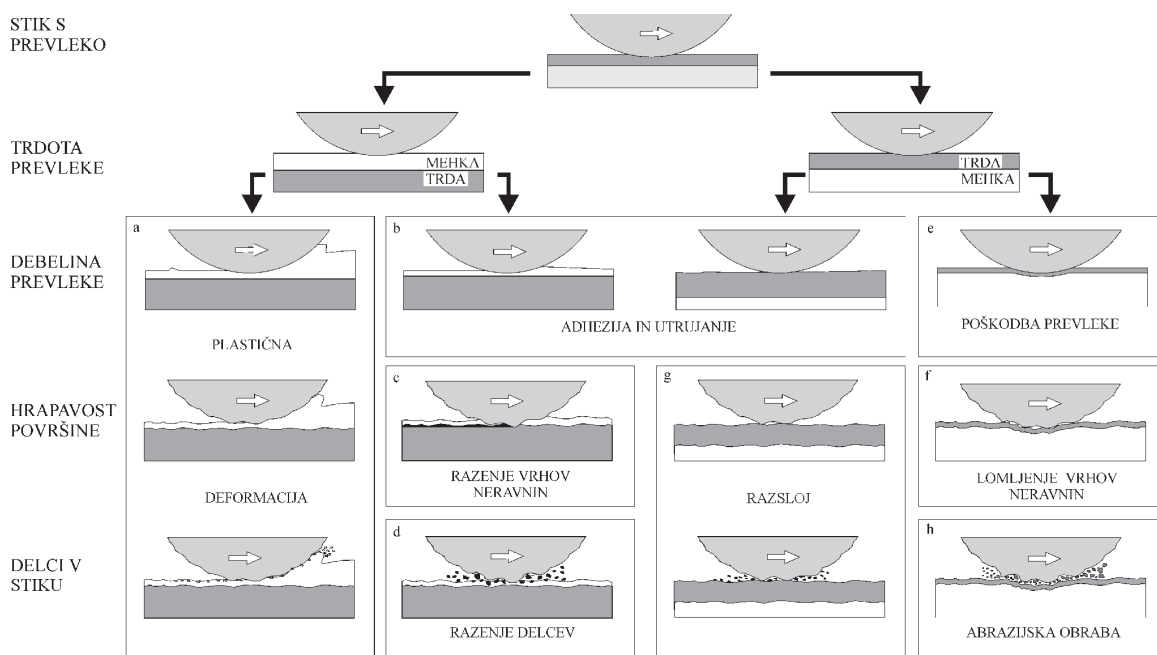
- trdota prevleke
- debelina prevleke
- hrapavost površine
- velikost in trdota delcev v stiku

Glede na kombinacijo teh štirih parametrov se lahko srečamo z najrazličnejšimi stičnimi situacijami, ki jih okarakterizirajo specifični obrabni mehanizmi ([10], [16] in [17]), kar prikazuje slika 2.

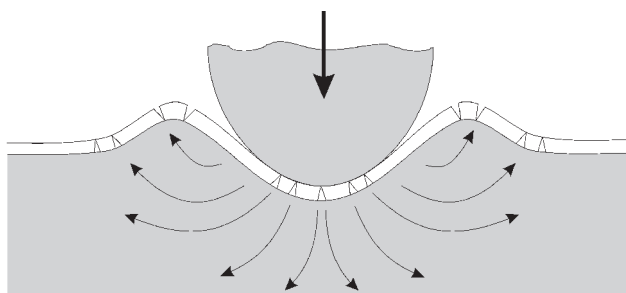
1.1 Trdota prevleke

Eden najpomembnejših parametrov, ki vplivajo na tribološko obnašanje oploščenih površin, je trdota prevleke oziroma razmerje med trdoto prevleke in trdoto podlage. Prednost uporabe mehkih prevlek je v znižanju koeficienta trenja [18], prav tako pa znižajo tudi natezne napetosti v stiku, ki zelo negativno vplivajo na širjenje razpok in s tem na obrabno odpornost elementa. Po drugi strani mehke prevleke niso zmožne prenašati obremenitve.

Trda prevleka nanese na "mehko" podlago preprečuje razenje površine ter s tem zmanjša njeno obrabo [17]. Imajo pa trde keramične prevleke pomanjkljivost, da povečajo trenje v tribološkem stiku, zaradi česar so uporabne predvsem v abrazijskih okoljih. S tvorjenjem mikrofilma z nizko strižno odpornostjo na površini prevleke je možno tudi v primeru trdih prevlek doseči nizek koeficient trenja in majhno stopnjo obrabe [19]. V tem primeru se striženje



Sl. 2. Obrabni mehanizmi pri prekritih površinah [17]

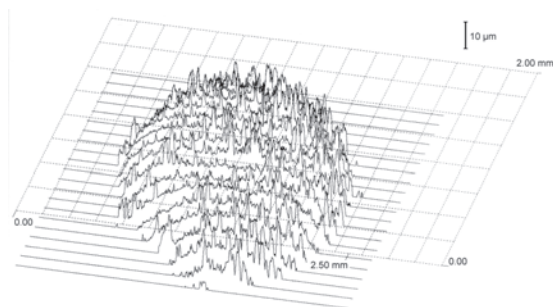


Sl. 3. Poškodba trdega površinskega sloja na "mehki" podlagi [10]

(drsenje) pojavi znotraj mikroplasti, medtem ko sama trda prevleka nosi obremenitev. Nadaljnje znižanje trenja in obrabe je mogoče doseči s povečanjem trdote podlage, s čimer preprečimo deformacijo površine in vpliv razenja ([16], [19] in [20]).

1.2. Debelina prevleke

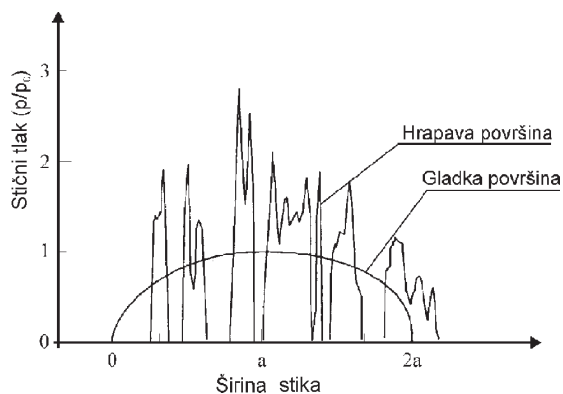
Naloga prevleke je ločevati stični površini ter z utrditvijo površine zmanjšati njuno obrabo. Če pri tem podlaga ni dovolj toga, da bi nosila obremenitev in dajala zadostno podporo trdi prevleki, lahko le-ta izgubi svojo vlogo. Pod vplivom obremenitve se bo prevleka deformirala v skladu z deformacijo podlage, pri čemer lahko upogibne napetosti v prevleki ter napetosti na meji med prevleko in podlago presežejo kritične vrednosti. To vodi do nastanka in širjenja razpok ter v končni fazi do odpovedi prevleke, kakor je prikazano na sliki 3 [21]. Poškodbo prevleke, zaradi prekomerne deformacije podlage, je mogoče rešiti s povečanjem debeline prevleke, ki nato sama lahko nosi obremenitev. S tribološkega vidika je uporaba tankih trdih prevlek primernejša, in to iz več vzrokov. Nanos debelih prevlek, še posebej v primeru fizikalnega nanašanja iz faze pare, je povezan z nastankom visokih tlačnih napetosti v prevleki, ki v najslabšem primeru lahko privedejo do luščenja prevleke [22]. Po drugi strani je, ob enakem upogibu, debela prevleka izpostavljena večjim upogibnim napetostim kakor tanka prevleka in nastale razpoke hitreje presežejo kritične vrednosti za porušitev ([23] in [24]).



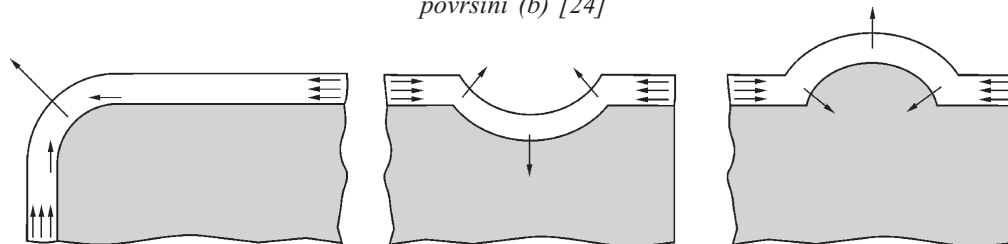
1.3. Hrapavost površine

V strojništvu se z idealno gladkimi površinami zelo redko srečujemo. To pomeni, da je treba hrapavost površine upoštevati pri analizi tribološkega stika. Enako velja tudi v primeru oplemenitenih stikih površin. V odvisnosti od metode oplemenitenja lahko ostane hrapavost površine več ali manj nespremenjena, lahko pa pride tudi do njenega povečanja. Pri drsenju dveh hrapavih površin razijo vršički neravnin trde oplemenitene površine po nasprotni površini, kar vpliva na povečanje trenja in obrabe, še posebej v začetni fazi drsenja ([24] in [25]). Hrapavost površine pa vpliva tudi na zmanjšanje realne stične površine in s tem na povečanje stičnega tlaka. Kakor je prikazano na sliki 4, ima hrapavost površine precejšen vpliv na porazdelitev stičnega tlaka p . Le-ta postane nepovezana in lahko mestoma tudi do trikrat preseže nominalne vrednosti Hertzovega stičnega tlaka p_0 [24]. Visoki stični tlaki ter krhkost prevleke pa zahtevajo dovolj togo podlago, ki je zmožna nositi obremenitev in dajati zadostno podporo prevleki.

Zaradi same narave procesa nanašanja trdih zaščitnih prevlek te vsebujejo visoke zaostale napetosti. Tlačne zaostale napetosti na splošno izboljšajo obrabno odpornost trdih prevlek, kar pa velja le v primeru idealno gladkih in ravnih površin. Pri strojnih elementih imamo vedno opazno hrapavost površine ter robove, prehode ipd. Na teh geometrijskih nepravilnostih zaostale napetosti inducirajo natezne in strižne sile, ki pospešujejo



Sl. 4. Topografija dejanske hrapave površine (a) in porazdelitev stičnega tlaka pri gladki in hrapavi površini (b) [24]



Sl. 5. Natezne in strižne napetosti na meji med prevleko in podlago, nastale na: robu (a), vboklini (b) in izboklini (c) [22]

medploskovno širjenje razpok, kakor prikazuje slika 5. Elementi so med obratovanjem izpostavljeni tudi zunanjim obremenitvam, ki se dodajo na zaostale napetosti. Vsota stičnih in zaostalih napetosti pa lahko na mestu geometrijskih nepravilnosti preseže oprijemljivost prevleke na podlago in s tem privede do luščenja prevleke [22]. Za preprečitev luščenja prevlek je tako treba hrapavost površine prilagoditi debelini in tipu prevleke ter stopnji obremenitve.

2 PLASTIČNA DEFORMACIJA

Pri večini oplemenitenih površin je običajna obraba le redko razlog za odpoved sistema. Odpoved oploščene površine se pojavi zaradi luščenja prevleke (adhezijska poškodba), pokanja prevleke (kohezijska poškodba) ali zaradi poškodbe podlage ([7], [9] in [27]). V vseh primerih je poškodba sistema posledica nastanka in širjenja razpok v prevleki ali v njeni neposredni bližini ([27] in [28]). Za napoved obnašanja oplemenitenih površin in določitev območja delovanja je tako nujna določitev porazdelitve napetosti ter začetka in širjenja cone plastične deformacije ([29] in [30]).

V primeru trdih prevlek je lega največjih strižnih napetosti odvisna od koeficienta trenja, debeline prevleke in togosti podlage [29] in [30] (sl. 6). V primeru nizkega koeficienta trenja ($< 0,3$) se le pri zelo tankih prevlekah plastična deformacija prične v podlagi, in to neodvisno od razmerja meje plastičnosti prevleke in podlage (σ_{yt}/σ_{yp}). S povečevanjem debeline prevleke se točka začetnega tečenja pomika na mejo med prevleko in podlago, v primeru razmeroma debelih prevlek nanosenih na togo podlago pa v samo prevleko, kakor prikazuje slika 6a. V primeru visokega koeficienta trenja ($> 0,3$) verjetnost nastanka plastične deformacije v podlagi ali v prevleki izgine in ostaneta le še dve možni legi, površina in vmesna plast med prevleko in podlago [30], (sl. 6b).

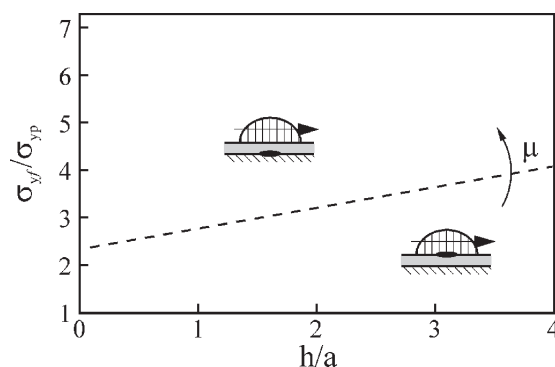
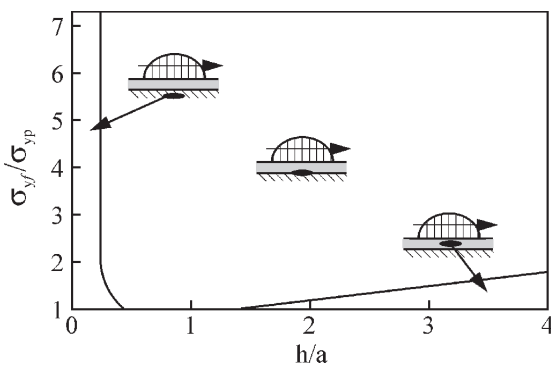
V večini dejanskih primerov, pri katerih imamo tanko obrabno odporno prevleko naneseo na razmeroma mehko podlago iz konstrukcijskega jekla, se plastična deformacija prične na meji med prevleko in podlago in le redko znotraj same prevleke ([29] in

[30]). S povečanjem koeficienta trenja in debeline prevleke pa se točka krajevnega tečenja pomakne na samo površino. Iz tega je razvidno, da napake materiala, kakor so mikro razpoke, vključki in hrapavost površine prevleke in podlage pomenijo vir zgostitve napetosti in začetka odpovedi oploščene sistema.

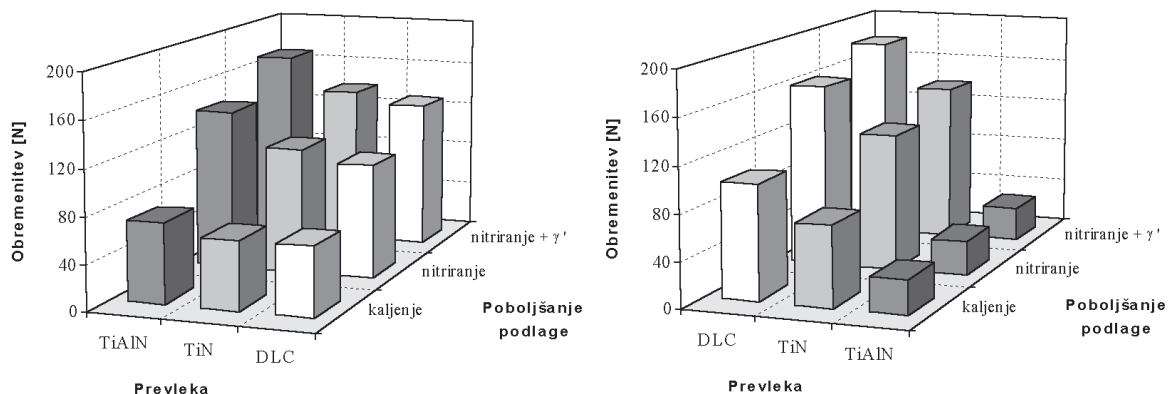
3 KOMBINACIJA KEMOTOPLOTNE PRIPRAVE PODLAGE IN NANOSA TRDE ZAŠČITNE PREVLEKE ALI PREVLEKE »DUPLEX«

Odpornost materiala proti obrabi, utrujanju ter koroziji je moč doseči z uporabo različnih postopkov poboljšanja ter postopki nanosa trdih zaščitnih prevlek. S povečevanjem zahtev po vse večjem izkoristku, daljši dobi trajanja in večji zanesljivosti elementov mehanskih sistemov, izpostavljenih zahtevnim obremenitvam, pa posamezni postopki poboljšanja ne dajejo več zelenih rezultatov. Postopki nitrocementacije in nitiranja, ki so zagotavljali boljšo obrabno odpornost ter odpornost proti utrujanju pri "običajnih" konstrukcijah, ne zmorejo več zagotavljati zapletenih zahtev po odpornosti proti utrujanju, obrabni odpornosti pri povišanih temperaturah, nizkemu trenju ter zmožnosti nošenja obremenitve. Kljub temu, da smo s prihodom tehnik nanašanja trdih prevlek dobili dodatne možnosti za oplemenitenje površine, pa so trde zaščitne prevleke običajno krhke in razmeroma tanke. V primeru nanosa prevleke na poboljšana konstrukcijska jekla z nizko trdoto površine bo prišlo pod vplivom obremenitve do elastične ali celo plastične deformacije podlage in s tem posledično do pokanja ter odpovedi prevleke ([17] in [31]). V nasprotju z žilavimi konstrukcijskimi jekli, ki so zmožna prenesti precejšnje elastične ali celo plastične deformacije brez poškodbe, pa lahko trde in krhke prevleke odpovedo že pri majhnih deformacijah podlage.

Rešitev opisanega problema je ponudila nova tehnika oplemenitenja površine, imenovana poboljšanje "duplex" ali prevleka "duplex". "Duplex" poboljšanje vključuje uporabo dveh različnih tehnik



Sl. 6. Pričetek plastične deformacije pri oploščeni površini (h – debelina prevleke in $2a$ – širina stika); $\mu = 0,25$ (a), $\mu \geq 0,5$ (b) [30]



Sl. 7. Kritična obremenitev poškodbe nizkolegiranega jekla, prekrita s trdo prevleko pri drsenju (a) in kotaljenju (b)

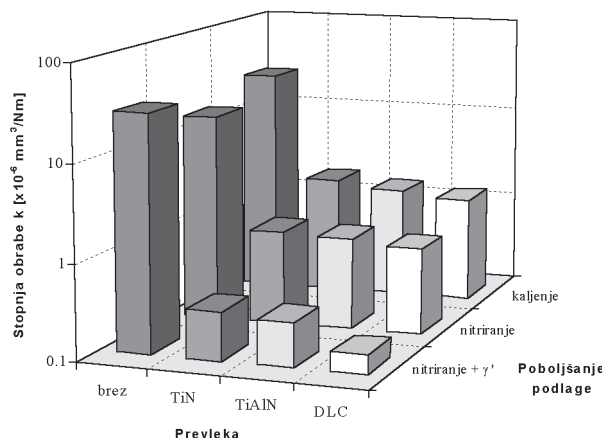
oplemenitenja površine in zagotavlja mehanske, metalurške, kemijske in tribološke lastnosti, ki z uporabo posameznega postopka oplemenitenja niso dosegljive ([9] in [14]). Osnovno načelo oplemenitenja "duplex" je združitev kemotoplotne priprave podlage in nanosa trde zaščitne prevleke, in sicer tako, da se njune prednosti združijo in pomanjkljivosti po možnosti izničijo [32]. Kompozit tako sestoji iz tanke zaščitne prevleke, ki zagotavlja želeno trdoto in tribološke lastnosti površine, plasti utrjenega materiala podlage, odgovornega za nošenje obremenitve ter žilavega jedra.

Izmed vseh možnih kombinacij se je kombinacija nitiranja v plazmi in fizikalnega nanosa trde prevleke iz faze pare izkazala kot najprimernejša za izboljšanje odpornosti ter triboloških lastnosti strojnih elementov ([14] in [33]). Nitiranje v plazmi poveča trdoto podlage ter vodi do nastanka visokih tlačnih napetosti v materialu podlage. Večja trdota podlage zmanjša njeno deformacijo in daje boljšo podporo prevleki (sl. 7). Po drugi strani imamo manjši gradient trdote in napetosti na meji med prevleko in podlago in s tem bolj enakomerno polje deformacij in napetosti. Eksperimentalni rezultati so pokazali, da nitiranje v plazmi izboljša tudi oprijemljivost prevleke na podlago ([15] in [34]).

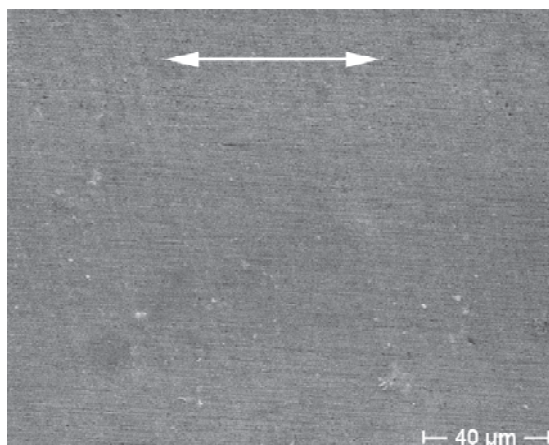
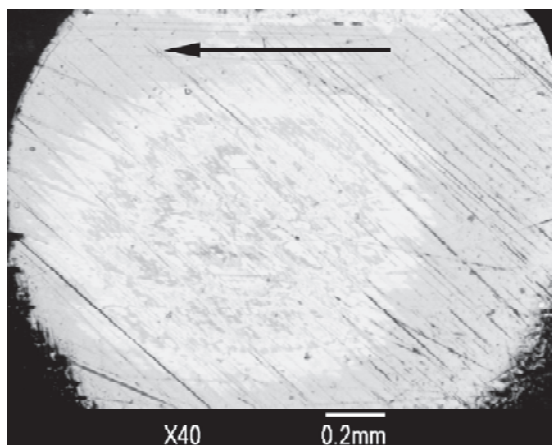
Analiza triboloških preizkusov je pokazala, da kombinacija nitiranja v plazmi ter nanosa trde zaščitne prevleke TiN, TiAlN ali diamantu podobne prevleke (DPP - DLC) daje površini boljšo zmožnost prenašati obremenitev ter tribološke lastnosti nizkolegiranih jekel, ki jih drugače ni moč doseči ([15], [19], [33] do [35]). Kakor prikazuje slika 8, je mogoče s pravilno izbiro kemotoplotnega oplemenitenja podlage ter nanosa trde zaščitne prevleke doseči izredno majhno stopnjo obrabe površine. Največje izboljšanje obrabne odpornosti je mogoče zaslediti v primerih, ko je diamantu podobna prevleka (DPP) nanosena na nitrirano podlago s tanko spojinsko plastjo λ' , in to tako v primeru drsenja kakor tudi kotaljenja (sl. 8 in 9) ([34] in [35]). Na sliki 10 je prikazanih nekaj praktičnih primerov uporabe prevlek DPP na strojnih elementih.

4 SKLEPI

- Tribološko obnašanje površin, oplemenitenih s trdimi prevlekami, je odvisno od velikega števila parametrov, od katerih so najpomembnejši razmerje trdote prevleke in podlage, debelina prevleke, hrapavost površine in zmožnost prevleke delati mikroplast z nizko strižno odpornostjo.



Sl. 8. Stopnja obrabe oplemenitenega nizkolegiranega jekla pri drsenju



Sl. 9. Površina nizkolegiranega jekla, prekrita s prevleko DPP, po preizkusu; (a) drsenje ($v_d = 1 \text{ m/s}$, $F_N = 60 \text{ N}$, $s = 1000 \text{ m}$), in (b) kotaljenje ($n = 150 \text{ min}^{-1}$, $F_N = 50 \text{ N}$, 10^6 ponovitev)



Sl. 10. Primeri uporabe prevlek DPP na strojnih elementih: (a) zobniki, (b) elementi motorja in (c) hidravlični elementi [36]

- Glavna zahteva za uspešno delovanje oploščenih sestavnih delov sta zadostna oprijemljivost prevleke na podlago ter zmožnost podlage dati zadostno oporo prevleki. Priprava podlage ima tako ključen vpliv na tribološko obnašanje trdih prevlek, namenjenih strojnemu delu. Pri tem je treba poudariti, da še tako trda in obrabno odporna prevleka odpove, če podlaga ne zagotavlja zadostne podpore, in/ali če je oprijemljivost prevleke na podlago neprimerna.
- Med sedanjimi postopki kemotoplotnega poboljšanja se je nitiranje v plazmi izkazalo kot najprimernejši postopek predpriprave površine strojnih delov za nanos trde zaščitne prevleke. S povečanjem nosilne zmožnosti jeklene podlage in izboljšanjem oprijemljivosti prevleke na podlago nitiranje v plazmi zagotavlja želene lastnosti strojnih delov, prekritih s trdo zaščitno prevleko.
- Zaradi krhkosti trdih prevlek in pomanjkanja znanja o vplivu maziva je uporaba trdih prevlek v strojništvu še vedno več ali manj omejena na preproste primere drsnega stika.

5 LITERATURA

- [1] Metals Handbook (1981) Vol. 4, Heat treating. Ohio, *American Society for Metals*.
- [2] Metals Handbook (1982) Vol. 5, Surface cleaning, finishing and coating. Ohio, *American Society for Metals*.
- [3] Bhushan, B. (1987) Overview of coating materials, surface treatments and screening techniques for tribological applications. Philadelphia, ASTM - STP 947, 289-309.
- [4] Metals Handbook (1992) Vol. 18, Friction, lubrication and wear technology. Ohio, *American Society for Metals*.
- [5] Smart, R.F. (1978) *Tribology International*, 11, 97-104.
- [6] Bhushan, B., B.K. Gupta (1991) Handbook of tribology; materials, coatings and surface treatments. New York, *McGraw-Hill*.
- [7] Holleck, H. (1991) *Surface Engineering*; 7, 137-144.
- [8] Subramanian, C., K.N. Strafford (1993) *Wear*, 165, 85-95.
- [9] Bell, T. (1992) *Industrial Lubrication and Tribology*, 44, 3-11.
- [10] Holmberg, K., A. Matthews (1994) Coatings tribology, New York, *Elsevier*.

- [11] Grainger, S. (1989) Engineering coatings - design and application. Cambridge, *Abington Publishing*.
- [12] Matthews, A, K. Holmberg, S. Franklin (1993) Thin films in tribology. Amsterdam, *Elsevier*, 429-439.
- [13] Knotek, O., F. Löffler, G. Krämer (1992) *Surf coat Technol*; 54/55, 241-248.
- [14] Bell, T., K. Mao, Y. Sun (1998) *Surf Coat Technol*, 108-109, 360-368.
- [15] Podgornik, B., J. Vižintin, O. Wänstrand, M. Larsson, S. Hogmark, H. Ronkainen, K. Holmberg (2001) *Wear*, 249, 254-259.
- [16] Holmberg, K., A. Matthews, H. Ronkainen (1998) *Tribologia*; 17, 6-22.
- [17] Holmberg, K., H. Ronkainen, A. Matthews (1993) Thin films in tribology. Amsterdam, *Elsevier*, 399-407.
- [18] Bowden, F.P., D. Tabor (1950) Friction and lubrication of solids. Oxford, *Claredon Press*.
- [19] Podgornik, B., J. Vižintin, H. Ronkainen, K. Holmberg (2000) *Thin Solid Films*, 377-378, 254-260.
- [20] Holleck, H., V. Schier (1995) *Surf Coat Technol*, 76-77, 328-336.
- [21] Leroy, J.M., B. Vilechaise (1990) Mechanics of coatings. Amsterdam, *Elsevier*, 195-201.
- [22] Wiklund, U., J. Gunnars, S. Hogmark (1999) *Wear*; 232, 262-269.
- [23] Posti, E., I. Nieminen (1989) *Materials & Manufacturing Processes*, 4, 239-252.
- [24] Chang, T.P., H.S. Cheng, W.D. Sproul (1990) *Surf Coat Technol*; 43/44, 699-708.
- [25] Sainsot, P., J.M. Leroy, B. Vilechaise (1990) Mechanics of coatings. Amsterdam, *Elsevier*, 151-156.
- [26] Hayward, I.P., I.L. Singer, L.E. Seitzman (1992) *Wear*; 157, 215-227.
- [27] Bergmann, E., J. Vogel, L. Simmen (1987) *Thin Solid Films*; 153, 219-231.
- [28] Hills, D.A., D. Nowell, A. Sackfield (1990) Mechanics of coatings. Amsterdam, *Elsevier*, 203-208.
- [29] Sun, Y., A. Bloyce, T. Bell (1995) *Thin Solid Films*, 271, 122-131.
- [30] Diao, D.F., K. Kato (1994) *Thin Solid Films*, 254, 115-121.
- [31] Vižintin, J. (1990) Mechanics of Coatings, Amsterdam, *Elsevier*, 417-425.
- [32] Kessler, O.H., F.T. Hoffmann, P. Mayr (1998) *Surf Coat Technol*; 108-109, 211-216.
- [33] Bell, T., H. Dong, Y. Sun (1998) *Tribology International*, 31, 127-137.
- [34] Podgornik, B., J. Vižintin (2001) *World Tribology Congress*. Vienna, Austria, 89-92.
- [35] Podgornik, B., J. Vižintin (2002) *Surf Coat Technol*, 157, 257-261.
- [36] <http://www.balzers.com/>

Naslov avtorjev: dr. Bojan Podgornik
 prof.dr. Jože Vižintin
 Center za tribologijo in tehnično
 diagnostiko
 Fakulteta za strojništvo
 Univerza v Ljubljani
 Bogišičeva 8
 1000 Ljubljana
 bojan.podgornik@ctd.uni-lj.si
 joze.vizintin@ctd.uni-lj.si

Prejeto: 23.12.2002
 Received:

Sprejeto: 29.5.2003
 Accepted:

Odprt za diskusijo: 1 leto
 Open for discussion: 1 year