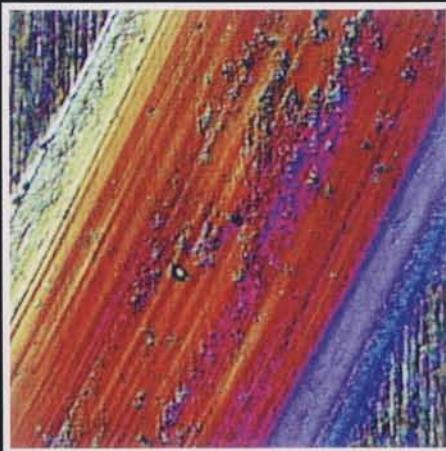
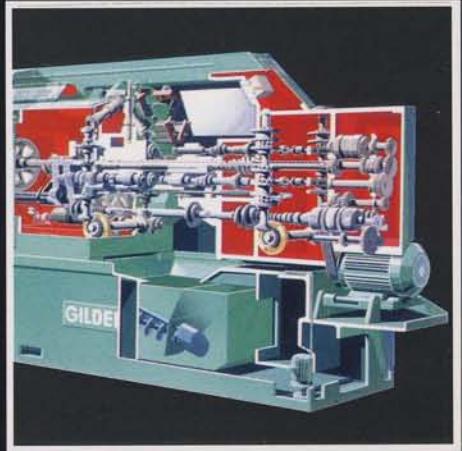


tribologija u industriji

tribology in industry ♦ трибология в промышленности

YU ISSN 0351 - 1642
GODINA XX
SEPTEMBAR 1998.

3



1979-1998
20 GODINA SA VAMA



(titelni u sklopu naslovnice)

tribologija u industriji

tribology in industry ◊ трибология в промышленности

sadržaj ◊ contents ◊ содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ВВЕДЕНИЕ

- M. BABIĆ: Tribologija u industriji - radovi tokom 20 godina ◊
Tribology In Industry - Papers During Twenty Years ◊
Трибология в промышленности - работы опубликованные
в течение двадцати лет 91

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

- K. D. BOUZAKIS, N. VIDAKIS: Moderne PVD prevlake - trenutno
stanje u oblasti, inovacije i buduće tendencije ◊ Advanced Physically
Vapour Deposited Coatings - State of The Art, Innovations and
Future Trends ◊ Современные ПВД покрытия - настоящее
состояние, новые приемы и будущие тенденции 97

REDAKCIJA

- B. IVKOVIĆ: Simulacija triboloških procesa u zoni rezanja na
tribometru "Block On Disk" ◊ Simulation of Tribological Processes
in The Cutting Zone on Tribometer "Block On Disc" ◊
Симулирование трибологических процессов в зоне резания
на трибометре "Block on Disk" 120

KNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ

- Članovi redakcija u proteklih 20 godina 125
- 131
- 132

Tribologija u industriji

- radovi tokom 20 godina -

1. UVOD

Tribologija kao moderan multidisciplinarni prilaz rešavanju kontaktnih problema prisutna je na prostorima Jugoslavije skoro od samog pojavljivanja.

U to vreme Laboratorija za obradu metala rezanjem Mašinskog fakulteta u Kragujevcu sa istraživačima okupljenim oko Prof. dr Branka Ivkovića bila je veoma pogodna sredina za prihvatanje tribologije kao novog prilaza. Naime, tribologija je prirodno implantirana u obimna i raznovrsna istraživanja obradivosti materijala. U narednim godinama dolazi do veoma intenzivnog rasta triboloških istraživanja baziranih na primeni metode površinske aktivacije u različitim oblastima, kao što su tribološki procesi na elementima za vođenje kretanja, elementima za prenos snaže i kretanja, tribološka svojstva sredstava za hlađenje i podmazivanje i dr. Paralelno sa razvojem triboloških istraživanja 1973. god. nastaje publikacija pod nazivom "Saopštenja laboratorije za obradu metala i tribologiju" u kojoj se publikuju rezultati triboloških istraživanja. Na ovoj osnovi u izdanju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu pod uredništvom Prof. dr Branka Ivkovića od 1978. godine počinje publikovanje prvog specijalizovanog tribološkog časopisa **TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI**. U redakciji su bili zastupljeni naučni radnici iz zemlje i inostranstva.

Početak publikovanja ovog časopisa je starijeg datuma čak i u odnosu na referentne svetske tribološke časopise, kao što su Trenije i iznos (1980.) i Wear (1982.).

Posle već blizu dvadeset godina redovnog štampanja bez prekida sa četiri broja godišnje časpis ima priznati međunarodni karakter i paralelno se izdaje u dve verzije, na srpskom jeziku i na engleskom jeziku pod nazivom **TRIBOLOGY IN INDUSTRY**.

U Tribologiji u industriji objavljeni su naučno-stručni radovi preko 300 autora iz naučno-istraživačkih institucija i industrijskih sistema iz zemlje ali i iz inostranstva. Njima su obuhvaćene osnovne, ali i neke granične oblasti tribologije kao novog multidisciplinarnog pristupa u nauci i tehnologiji. Najveći broj radova objavljen je u oblastima tribologije obradnih procesa, tribologije mašinskih elemenata i sistema, tribometrije i modifikovanja kontaktnih površina.

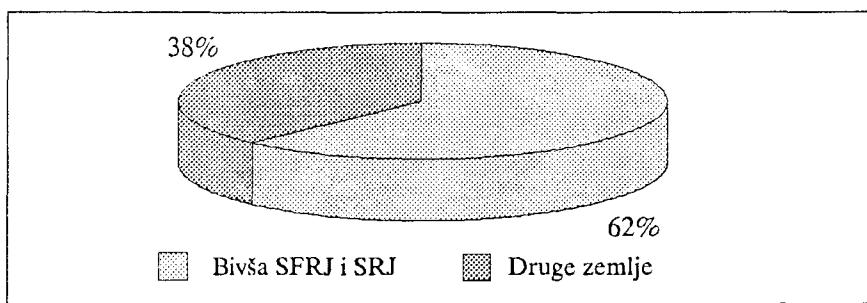
Časopis je uspeo da uspešno prenese atuelno stanje istraživanja ne samo kod nas, već i u svetu i ima nesumljiv doprinos u razvoju istraživačkog ka-

dra na ovim prostorima i prenosu postojećih triboloških znanja u praksu.

2. AUTORI

Tokom davadeset godina kontinualnog publikovanja 79 brojeva časopisa Tribologija u industriji objavljeni su naučno-stručni radovi zavidnog broja autora iz različitih naučno-istraživačkih institucija i industrijskih sistema iz zemlje ali i iz inostranstva.

Ukupan broj autora u samostalnim i koautorskim radovima iznosi 337. Među njima najveći broj, njih 210, je iz Jugoslavije, tačnije sa prostora bivše SFRJ i SRJ (sl.1.). Naime, časopis Tribologija u industriji osnovan 1978. godine bio je i ostao do današnjih dana jedini specijalizovani tribološki časopis na ovim prostorima. Kao takav prirodno je prihvatan kao zvanični časopis triboloških asocijacija na nivou zemlje - prvo Jugoslovenskog komiteta za tribologiju (u SFRJ), a zatim i Jugoslovenskog društva za tribologiju (u SRJ). Na taj način časopis je bio istovremeno i centar tribološkog okupljanja kome su gravitirali kako istraživači iz bivših jugosloven-



Slika 1.

skih republika, tako i iz današnje Jugoslavije.

Takođe je značajno učešće sa oko 38% autora iz drugih zemalja (sl. 2.). Među njima najveći je broj iz susednih zemalja (Rumunije, Bugarske i Grčke) i zemalja istočne Evrope (najviše iz bivšeg SSSR-a i Rusije). Međutim, u časopisu su rezultate svojih istraživanja objavljivali i istraživači iz USA, SR Nemačke, Engleske, Kine i drugih zemalja.

U proteklim godinama najveći broj radova u časopisu objavili su naučno istraživački radnici zaposleni na jugoslovenskim univerzitetima, u naučnim institutima, laboratorijama i razvojnim službama većih industrijskih sistema. Poslednjih godina, međutim, pojavljuju se sve više i radovi domaćih autora iz industrije koji saopštavaju rezultate iz oblasti razvoja proizvoda, unapređenja tehnologije obradnih procesa i posebno održavanja proizvodne i druge opreme.

2. RADOVI IZ TRIBOLOŠKE OBLASTI

Tokom prethodnih godina u časopisu je objavljeno 489 članaka. Od toga 316 naučnih i stručnih radova, 78 uvodnika, 41 izveštaj iz neposredne prakse i 51 izveštaj o tribološki relevantnim novostima (sl.3.).

Objavljeni radovi u popunosti odslikavaju mulidisciplinarnosti tribologije kao novog koncepta oslonjenog na više postojećih tradicionalnih baznih naučnih i tehničkih disciplina koje su relevantne sa aspekta prirode i efekata kontaktnih pojava. U njima su obrađeni problemi i rezultati istraživanja iz svih osnovnih oblasti triboloških istraživanja:

- triboanalize (teorijske osnove tribologije i baznih nauka),
- tribomaterijala (izučavanje triboloških svojstava materijala i upravljanje ovim svojstvima),
- tribotehnike (tehnička sredstva u kojima se odvijaju tribološki procesi),

- tribotehnologije (tehnološke metode upravljanja tribološkim karakteristikama tribosistema),
- tribomonitoringa (sredstva i metode dijagnostike, kontrole i ispitivanja tribosistema),
- triboinformatike (sredstva i metode obrade, čuvanja i korišćenja triboloških informacija).

U okviru ovako globalno definisanih oblasti radovi tretiraju problematiku koja se bliže može odrediti kao:

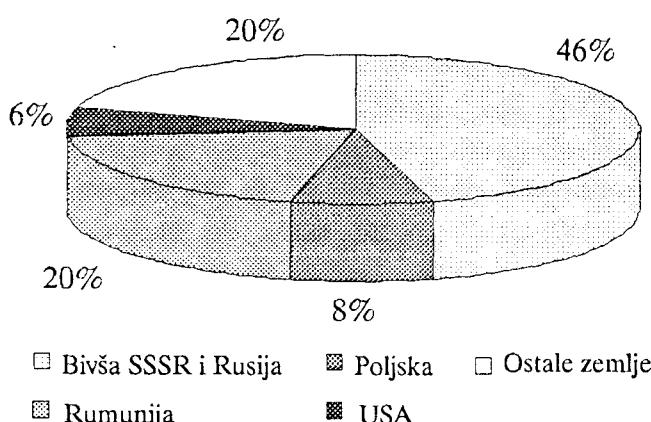
- ▶ Tribologija obradnih procesa,
- ▶ Tribologija realnih mašinskih elemenata, mašinskih sistema i tehničkih sistema,
- ▶ Tribometrija i tribodijagnostika,
- ▶ Podmazivanje i maziva,
- ▶ Tribomaterijali,
- ▶ Hrapavost kontaktnih površina,
- ▶ Modifikovanje i regenerisanje kontaktnih površina,
- ▶ Tehnološko nasleđe,
- ▶ Održavanje,
- ▶ Tribodizajn,
- ▶ Tribološki informacioni sistemi,
- ▶ Energija i ekologija kroz tribologiju.

U ukupnom broju radova najveći broj (30%) posvećen je tribologiji procesa rezanja i procesa deformisanja metala (slika 4.). Pri tome su u ovoj grupi dominantniji (73%) radovi koji se bave najrazličitijim tribološkim aspektima procesa rezanja (sl. 5.). Oni su posvećeni pre svega:

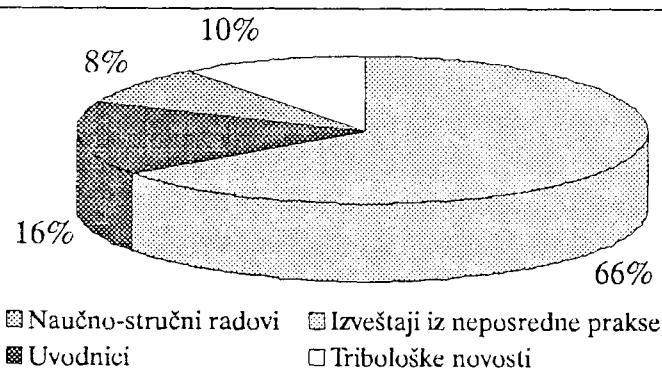
- sredstvima za hlađenje i podmazivanje,
- alatima i alatnim materijalima i
- različitim aspektima triboloških procesa i njihovih manifestacija, kao što je postojanost alata, troškovi alata, otpori rezanja, obradivost materijala i dr.

Drugi po brojnosti (23% od ukupnog broja) su radovi posvećeni tribologiji realnih mehaničkih sistema i njihovih elemenata.

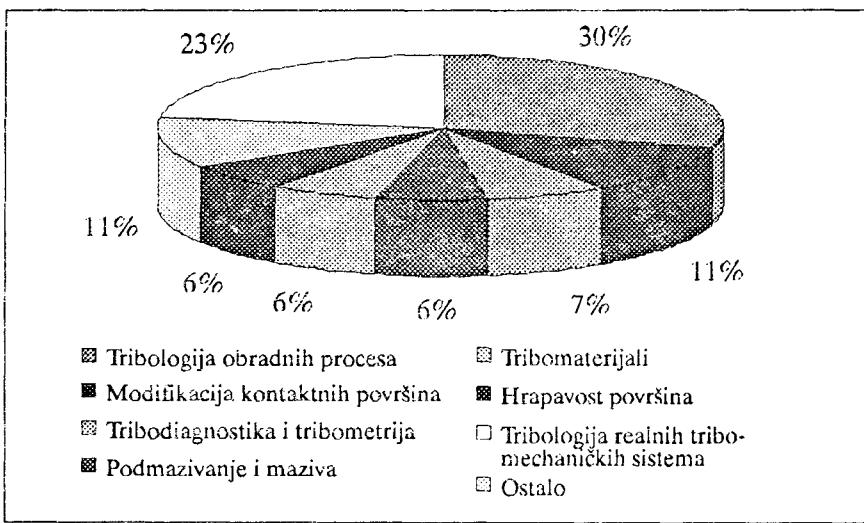
Zatim, s obzirom na zastupljenost u radovima, slede oblasti modifikovanja i regenerisanja kontaktnih površina (11%), tribometrije i tribodijagno-



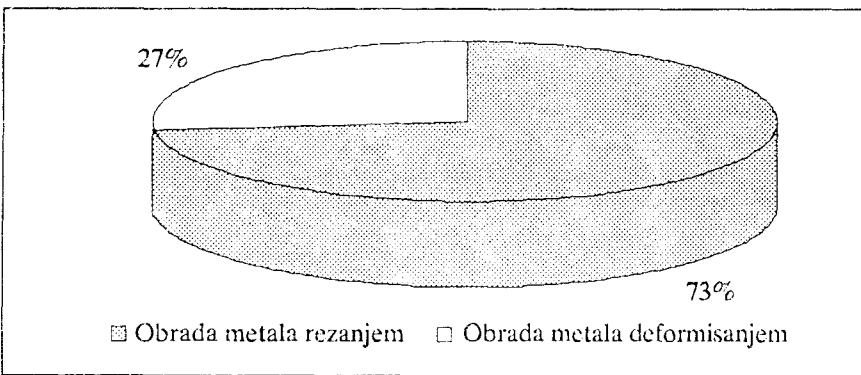
Slika 2.



Slika 3.



Slika 4.



Slika 5.

stike (7%), maziva i podmazivanja (6%) i tribomaterijali (6%). Učešće ostalih oblasti u ukupnom broju radova kreće se od 1 do 3%. Svakako treba istaći da je ovakva podela napravljena uz određena zanemarivanja postojećih preklapanja oblasti, što je inače karakteristično za tribologiju kao multidisciplinarni koncept.

Analizom objavljenih radova uočava se i određena distribucija pobrojanih oblasti vremenskom domenu. Ona korespondira sa dominantnim interesom istraživača za određenu problematiku u datom vremenskom periodu tokom proteklih godina, što je posledica razvoja tribologije kao nauke i tehnologije i promene aktuelnosti istraživačkih zadataka. Tako prvi godina izlaženja časopis pokriva pre svega raznovrsnu problematiku tribologije rezanja i tribologiju realnih tribomehaničkih sistema i njihovih elemenata. Vremenom se povećava

broj radova posvećen tehnološkom nasleđu, tribometriji, tribologiji procesa obrade metala deformisanjem i sl. Poslednjih godina posebno je izraženo povećanje interesovanja za tribološke efekte jonsko plazmenih postupaka modifikovanja kontaktnih površina i globalne teme, kao što je mogućnost doprinosa štednji energije i očuvanju životne sredine kroz tribologiju.

3. GENERALNI POGLED NA RADOVE U NAJZASTUPLJENIJIM OBLASTIMA

3.1. Obradni procesi

Kako je već pokazano najveći broj objavljenih radova pripada oblasti tribologije obradnih procesa. Među njima preko 70% radova tretira problematiku tribologije obrade metala rezanjem, ostali radovi problematiku

tribologije obrade metala deformisanjem.

Analiza pokazuje da je obrada metala rezanjem sa tribološkog aspekta u radovima tretirana generalno s dva aspekta:

Tribološke pojave i njihove posledice na elemente tribomehaničkog obradnog sistema, sam proces obrade, različite parametre funkcionisanja sistema (tačnost i kvalitet obrade) i povećanje troškova obrade - i to ne samo kroz povećanje troškova alata, već i kroz povećanje troškova maštine;

Uticaj tehnologije i parametara obrade na tribološka svojstva obrađenih površina elemenata tribomehaničkih sistema uz pojavu tzv. tehnološkog nasleđivanja u lancu operacija obrade rezanjem. Pri tome i stanje razvoja procesa habanja alata pokazuje uticaj na tribološki relevantne parametre obrađenih površina.

Pojave trenja i habanja u elementarnim tribomehaničkim sistemima u kojima se odvija proces obrade rezanjem uzrokuju negativne posledice koje se najdirektnije iskazuju kao gubitak energije na savladavanje trenja i gubitak materijala sa kontaktnih površina reznog klina usled habanja, koji postepeno narušava reznu geometriju sve do stanja kritične pohabnosti i onemogućavanja uspešnog procesa rezanja. Posebna pažnja u radovima posvećena je smanjenju ovih negativnih posledica tribološkim unapređenjem tribomehaničkog obradnog sistema kroz primenu savremenih alatnih materijala i postupaka modifikovanja njihovih kontaktnih površina. Ovi efekti u radovima se iskazuju preko postojanosti alata, otpornosti na habanje, intenziteta habanja, otpora rezanja, temperatura rezanja, stanja površinskih slojeva predmeta obrade, ali i preko troškova obrade i produktivnosti obradnih i proizvodnih sistema. Izneti su, takođe, rezultati istraživanja u kojima je promovisan ubrzani metod dobijanja krivih habanja alata na bazi merenja otpora rezanja alatima različitog stepena pohabnosti, od-

nosno na bazi odgovarajuće funkcije priraštaja otpora rezanja.

Osim posledica na alat u radovima se tretiraju posledice triboloških procesa kod ostala dva elementa u strukturi obradnog tribomehaničkog sistema: predmet obrade - kao pojava površinskog defektnog sloja predmeta obrade sa znatno izmenjenim karakteristikama u odnosu na osnovni materijal; sredstva za hlađenje i podmazivanje - kao promena fizičko-hemiskih karakteristika, odnosno gubitak topotne provodljivosti i podmazujućih svojstava i kontaminacija.

U prvim godinama (do 1983. godine) posebno su bili frekventni radovi posvećeni sredstvima za hlađenje i podmazivanje. Oni se pre svega odnose na:

- ▶ tribološka svojstava sredstava za hlađenje i podmazivanje i
- ▶ poslovanje sredstvima za hlađenje i podmazivanje.

Ispitivanjima, čiji su rezultati publikovani, obuhvaćene su sve osnovne vrste obrade rezanjem (struganje, glodanje, bušenje, brušenje, rezanje navoja, odvalno glodanje, provlačenje i duboko bušenje), odnosno, sve vrste sredstava za hlađenje i podmazivanje: emulzije, vodotopivi rastvorovi i rezna ulja.

Tribološka svojstva, kao i u slučaju alata, iskazivana su preko različitih parametara, pa se može generalno govoriti o triboekonomskom pristupu.

U ovoj oblasti najveći broj radova objavili su autori iz Laboratorije za obradu metala rezanjem i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu. Specifičnost objavljenih rezultata predstavlja razvoj i primena postupka površinske aktivacije alata za određivanje triboloških svojstava sredstava za hlađenje i podmazivanje.

Od ukupnog broja radova iz oblasti tribologije obradnih procesa 25 radova posvećeno je tribologiji obrade materijala plastičnim deformisnjem. U njima se iznose rezultati istraživanja mehanizama triboloških

pojava trenja i habanja i mogućnosti smanjenja njihovih štetnih posledica na proces obrade unapređenjem triboloških svojstava alata i maziva.

Zapaža se poseban interes za rešavanje problema određivanja koeficijenta trenja, bilo da se radi o procesima zapreminskog deformisanja ili dubokog izvlačenja. Naime, kontaktno trenje egzistira praktično u svim procesima obrade materijala deformisanjem. Iako je trenje u nekim kontaktnim parovima sistema predmet obrade/alati neophodno za odvijanje procesa (pri dubokom izvlačenju za držanje venca predmeta obrade, pri valjanju za obezbeđenje transporta lima, pri vučenju cevi za držanje plivajućeg trna, kod specijalnih postupaka sa aktivnim trenjem) ono se pojavljuje kao uzrok niza negativnih pojava u procesu obrade, kao što su neravnometerna distribucija specifičnog pritiska, neravnometerna deformacija po zonama, pojava dopunskih napona itd.

3.2. Tribologija mehaničkih elemenata i sistema

Druga po brojnosti grupacija radova obuhvata široko područje istraživanja triboloških pojava, njihovih negativnih efekata i mogućnosti smanjenja ovih efekata kod mehaničkih sistema i njihovih elemenata. Njima su obuhvaćeni:

- zupčanici,
- ležajevi,
- triboelementi motora,
- lanci,
- kardanski prenosnici,
- vođice,
- upravljački mehanizmi,
- pužni prenosnici,
- amortizeri,
- bregasti mehanizmi,
- kočnice,
- zaptivke,
- kompresori,
- poljoprivredne mašine,
- vibraciona sita i dr.

S obzirom na broj radova najveća istraživačka pažnja bila je usmerena na tribologiju zupčanika. Ovo je sva-kako uslovljeno njihovom nezamenljivom ulogom u najraznovrsnijim tribomehaničkim sistemima za prenos kretanja i snage u tehničkim sistemima.

Zastupljenost ovih radova u časopisu tokom proteklih godina publikovanja skoro je potpuno ravnomerna. Njima su obuhvaćeni najčešće sledeći problemi tribologije zupčanika:

- ▶ Mehanizmi i oblici habanja bokova zuba zupčanika, posebno pojava pitinga,
- ▶ Energetski gubici usled trenja i uticajni faktori (viskozitet ulja, konstrukcijski parametri, hrapavost kontaktnih površina, karakter raspodele opterećenja itd.),
- ▶ Metodi proračuna zupčanika sa tribološkog aspekta,
- ▶ Razvoj i primena uređaja i postupaka za ispitivanje zupčanika,
- ▶ Tribodizajn zupčanika i zupčastih prenosnika,
- ▶ Uticaj završne obrade i tehnološkog nasledja na tribološko ponašanje zupčanika.

U objavljenim brojevima časopisa, pored radova posvećenih tribologiji zupčanika, zapaženu frekvenciju imaju radovi posvećeni tribologiji tribomehaničkih sistema za vođenje kretanja. U njima dominiraju sledeći istraživački zadaci:

- ▶ Razvoj i primena uređaja i postupaka za merenje osnovnih tribometrijskih parametara kliznih ležišta, kotrljajnih ležaja i vodica,
- ▶ Tribološki procesi kod kliznih ležišta, kotrljajnih ležaja i vodica,
- ▶ Materijali za izradu kliznih ležišta i elemenata kotrljajnih ležaja,
- ▶ Tribodizajn kliznih ležišta i kotrljajnih ležaja,
- ▶ Izbor maziva,
- ▶ EHD podmazivanje i
- ▶ Frikcioni gubici u kliznim ležištima i kotrljajnim ležajima.

3.3. Tribomonitoring

Oko 7% objavljenih radova pripada globalnoj kategoriji tribomonitoringa koja obuhvata:

- tribodijagnostiku - metode i sredstva kontinualne kontrole stanja triboloških parametara tribomehaničkih elemenata i sistema i
- tribometriju - metode i sredstva merenja osnovnih ulazno-izlaznih i strukturnih parametara tribosistema.

Sva istraživanja ovog tipa u principu su namenjena rešavanju određenog tribološkog problema ili izučavanju mehanizma triboloških pojava.

U domenu tribodijagnostike objavljeni radovi posvećeni su:

- izboru dijagnostičkih parametara i metoda njihovog merenja u oblasti obradnih centara i
- primeni ferografije u tribodijagnostici.

Skoro 80% radova iz tribomonitoringa pripada užoj oblasti tribometrije i pre svega se odnose na razvoj i primenu tribometrije za ispitivanja u lабораторијским uslovima i to:

- uređaja, mernih sistema i postupaka merenja za ispitivanje mašinskih elemenata i
- tribometara, mernih sistema i postupaka merenja za ispitivanja na uprošćenim modelima.

Prva grupa radova i uređaja odnosi se pre svega na tribometriju zupčanika, kliznih ležišta, kotrljajnih ležaja, kardanskih mehanizama i vođica. Među njima, dominantan je broj radova iz Laboratorije za obradu metala rezanjem i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu. Prezentirani rezultati baziraju na istraživanjima triboloških procesa uz primenu tzv. radioaktivne metode za praćenje habanja.

Druga grupa radova je znatno brojnija. Razlozi za dominaciju istraživanja na tribometrima nad drugim tribometrijskim istraživanjima (što je danas vidljivo u svim tribološkim publikacijama u svetu) su brojni, a pre svega:

- ▶ Jednostavna geometrija i male dimenzijske kontaktnih elemenata,
- ▶ Mogućnost variranja i kontrole relevantnih parametara radnih uslova i strukture opitnog tribosistema,
- ▶ Mogućnost pouzdanog merenja tribometrijskih karakteristika,
- ▶ Kratko vreme dobijanja rezultata i niža cena ispitivanja.

Poslednjih godina radovi u oblasti tribometrije posvećeni su pre svega istraživanju pouzdanih postupaka za istraživanje triboloških efekata primene savremenih postupaka modifikovanja kontaktnih površina.

3.4. Modifikovanje kontaktnih površina

Od 1986. godine u časopisu je veoma prisutna problematika modifikovanja kontaktnih površina u cilju unapređenja triboloških svojstava. Prodor tribologije modifikovanja u časopis Tribologija u industriji počeo je u radovima tzv. preglednog karaktera u kojima su izneta svetska dostignuća, trendovi i tribološki potencijali. Ovaj prodor se i desio sa kašnjenjem od nekoliko godina u odnosu na referentne svetske tribološke časopise. On vremenski korespondira snažnije komercijalizaciji jonsko plazmennih postupaka za deponovanje prevlaka na elementima tribomehaničkih sistema.

U početku predmet istraživanja bila je mogućnost unapređenja triboloških svojstava alata u obradi metala rezanjem (pre svega primenom jednoslojnih i višeslojnih prevlaka na plošicama od tvrdog metala).

Sa usavršavanjem PVD tehnologija u pogledu sniženja temperature depovanja znatno se proširilo područje istraživanja, kako s aspekta materijala substrata i vrsta prevlaka tako i sa aspekta primene. Ova istraživanja mogu se uslovno podeliti na dve grupe:

- istraživanja mogućnosti primene prevlaka na konkretnе tribomehaničke sisteme (na primer kardanski prenosnici, triboelementi kompresora u hladnjacima itd.) i

- modelska istraživanja triboloških mehanizama i efekata primene različitih postupaka modifikovanja kontaktnih površina (ion plating, sputtering, arc deposition, duplex treatment i dr.) i vrsta prevlaka (TiN, TiAlN, Ti(C,N), ZrN, TiN na nitriranom sloju, MoS₂, PTFE, WS₂ i dr.).

Osim prevlaka u radovima se iznose i rezultati istraživanja postupka modifikovanja na bazi promene svojstava materijala u kontaktim slojevima, kao što su jonska implantacija i bombardovanje čeličnim kuglicama.

Generalizacijom dobijenih rezulata, nezavisno od metoda tretmana površina, može se zaključiti da tribološke karakteristike modifikovanih površina ne predstavljaju njihovo iminentno svojstvo, već su rezultat tribološke interakcije u određenim uslovima kontakta. To uslovjava da se i razlike u tribološkim efektima ispitivanih tipova modifikovanja ne mogu prihvati kao apsolutne, već predstavljaju funkciju uslova kontakta, pa čak i nemaju isti karakter u širem rasponu variranja uslova kontakta.

Problem izbora komplikuje i činjenica da nema poklapanja efekata sa aspekta trenja i habanja, što nameće često neophodnost davanja prioriteta otpornosti na habanje ili koeficijentu trenja kao kriterijumu. Čak kada se ima u vidu samo otpornost na habanje izbor zavisi od toga da li su prioritetni efekti na jednom kontaktom elementu ili kontaktom paru, što je opredeljeno strukturonom tribosistema.

U konačan izbor optimalnog postupka modifikovanja za rešavanje konkretnog tribološkog problema neophodno je uvesti i finansijske efekte, tako da se može govoriti o trib-ekonomskom kriterijumu izbora.

4. ZAKLJUČAK

U Tribologiji u industriji objavljeni su naučno-stručni radovi zavidnog broja autora iz naučno-istraživačkih institucija i industrijskih sistema iz zemlje

ali i iz inostranstva. Njima su obuhvaćene osnovne i neke granične oblasti tribologije kao novog multidisciplinarnog pristupa u nauci i tehnologiji.

Najveći broj radova objavljen je u oblastima tribologije obradnih procesa, tribologije mašinskih elemenata i sistema, tribometrije i modifikacijama.

vanja kontaktnih površina. Globalno posmatrano može se uočiti određena vremenska neujednačenost prisustva pojedinih tema, što odgovara njihovoj aktuelnosti u svetu.

Časopis je uspeo da uspešno prenese stanje istraživanja ne samo kod nas, već i u svetu i ima nesumnjiv doprinos u razvoju istraživačkog kadra na

ovim prostorima i transferu postojećih triboloških znanja u praksi.

LITERATURA

- [1.] **Tribologija u industriji**, brojevi od 1/78 do 2/98

Tribology In Industry - Papers During Twenty Years

This year is the twenty year anniversary of the Journal "Tribology in Industry". The Journal has an international character and for the last three years it is published parallelly in Serbian and English.

Authors from Yugoslavia and foreign countries (over 300 of them) have published 316 scientific and expert papers, and numerous reports and tribological news from immediate practice.

The journal constitutes greatly to transfer of tribological knowledge and development of the research staff.

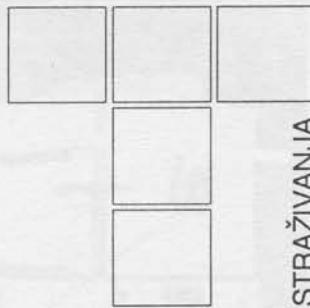
Трибология в промышленности - работы опубликованные в течение двадцати лет

В настоящем году исполняется двадцать лет непрерывного печатания журнала Трибология в промышленности. Журнал международного характера и публикуется в сербском и английском языках.

Больше трехсот отечественных и заграничных авторов опубликовали 316 научных и профессиональных работ, ряд сообщений и трибологических новостей из непосредственной практики. Наибольшее число работ относится к трибологии процессов обработки, трибологии деталей машин и систем, трибологии и модифицированию контактирующих поверхностей.

Журнал способствует распространению трибологических знаний и развитию исследовательских кадров.

K. D. BOUZAKIS, N. VIDAKIS



ISTRAŽIVANJA

Moderne PVD prevlake - trenutno stanje u oblasti, inovacije i buduće tendencije

Evolucija PVD metode, kao tehnike proizvodnje tankih filmova, je razlog za veliku rasprostranjenost ovih prevlaka širom sveta. Od prvih dana nastanka ove metodologije, kada su prevlake ovog tipa proizvedene jednostavnim isparavanjem metala, sprovedena su mnogobrojna istraživanja i razvoj, dodajući ovoj metodi visok stepen sofisticiranosti. Danas su moderne i komplikovane tehnike uključene u sisteme proizvodnje filmova, što dovodi do razvoja širokog spektra različitih tipova prevlaka. Na taj način, prevlake se mogu proizvesti kao meki, tvrdi ili super tvrdi filmovi, bilo kao jednoslojni ili višeslojni nanosi, zadovoljavajući sve potencijalne potrebe poboljšanja konvencionalnih materijala. Uzimajući u obzir rastuće industrijske i proizvodne zahteve, zahteva se jedna dobro organizovana utakmica za karakterizaciju procesa za stvaranje prevlaka. Ovaj rad opisuje ciljeve nove generacije PVD prevlaka i nove metode koji se koriste za ocenu njihovih performansi, posebno kad su u pitanju njihov vek trajanja pri dinamičkom stanju napona.

Ključne reči: PVD prevlake, višeslojne prevlake, vek trajanja, karakterizacija prevlaka.

1. UVOD

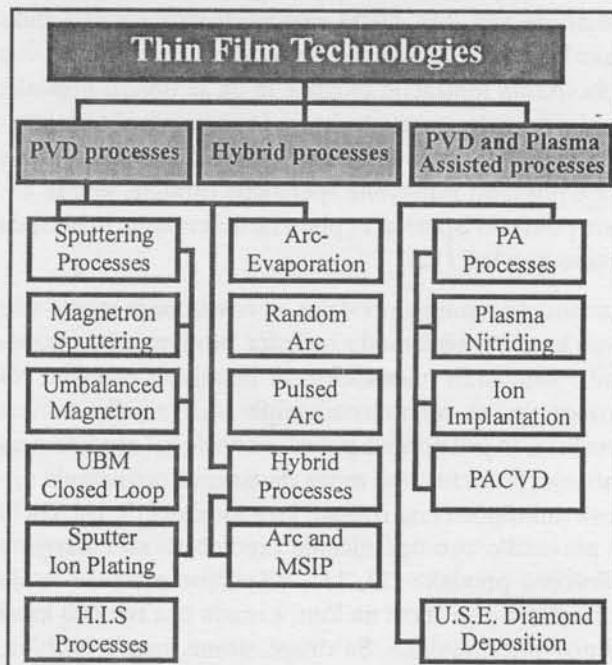
Površinsko poboljšanje osnovnih materijala ograničenih svojstava, uz pomoć PVD prevlaka je postalo vrlo poznata i ekonomski zadovoljavajuća praksa [1]. Na ovaj način, mogu se ostvariti pogodne mehaničke, fizičke i hemijske osobine, pomoću tankih i tvrdih jednoslojnih ili višeslojnih prevlaka preko konvencionalnih konstruktivnih materijala. PVD metoda je odgovarajuća za razvoj novih procesa i inovacionih rešenja, pošto je ona zasnovana na postepenim postupcima za nastajanje rasta filma [2].

Jedna od najprivlačnijih prednosti PVD metode su relativno niske potrebne temperature za nanošenje prevlaka [3, 4]. Ova osobina čini ovu metodu pogodnom za materijale na čiju tvrdoću može uticati nekontrolisano žarenje u komori za prevlačenje, kao što su ojačani čelici, brzorezni čelici i biomehanički materijali. Najpoznatije vrste ove metode prikazane su na slici 1 [5, 6]. Značajno je to da većina prikazanih metoda može biti primenjena sa istom opremom uz odgovarajuće podešavanje i konfiguraciju. Odavde sledi da se prevlaka željenih karakteristika može dobiti prilagođavanjem PVD procesa.

Fotografija na slici 2 prikazuje modernu PVD opremu, sposobnu da proizvede širok spektar zaštitnih prevlaka. Manja fotografija u donjem desnom uglu na istoj slici

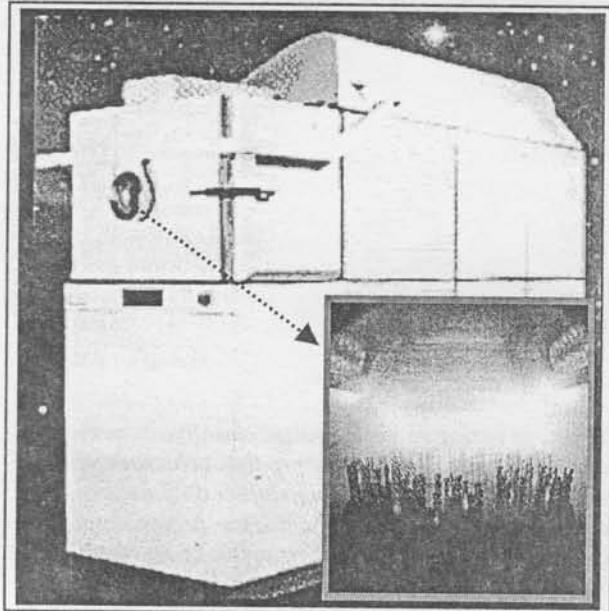
ilustruje primenu PVD postupka na burgije od brzorezog čelika unutar komore za prevlačenje [7].

Ovakvi uređaji za nanošenje prevlaka, osim njihove osnovne namene, to jest stvaranja tankih čvrstih filmova, danas mogu da ostvare i niz različitih dodatnih karakteristika prevlaka koje poboljšavaju njihov kvalitet. Na primer, osnovni faktor da bi prevlake imale visoke performanse je dobra priprema površine. Funkcionalne



Slika 1. Uobičajene vrste PVD metoda

K. D. Bouzakis, N. Vidakis
Laboratorija za alatne mašine i proizvodno inženjerstvo
Aristotelov Univerzitet, Solun, Grčka



Slika 2. Tipično PVD postrojenje sa složenim planetarnim kretanjem komada koji se prevlače i mogućnošću nanošenja višeslojnih prevlaka

PVD prevlake zahtevaju izuzetno čiste površine odgovarajuće topografije. Mada se čišćenje može vršiti u posebnim sistemima za čišćenje, kad god se osnovni materijal iznese iz sistema za čišćenje ili završnu obradu, on trentno počinje ponovo da oksidiše. Novi koncept za prevažilaženje ovog problema je razvoj postupka za RF-nagrizanje [8, 9]. RF-nagrizanje uklanja oksidisani sloj dok je alat unutar komore za prevlačenje.

Još jedan sofisticirani koncept u ovakvim modernim uređajima je poboljšanje ionizacije kroz neuravnoteženi magnetron (UBM), čime se rešava problem niskog stepena ionizacije [10, 11]. UBM proizvodi visoki jonski fluks kako blizu mete, tako i na znatnom udaljenju. Usled ovog poboljšanja ionizacije moguće je da se oblažu prevlake visoke tvrdoće, gусте strukture i visokog kvaliteta površine. Štaviše, mogu se dobiti i bolji kvalitet prevlaka i bolje posebno zahtevane specifične osobine, ako se koriste pokretni isparivači i planetarno kretanje materijala koji se prevlači [12].

Zavisno od namena prevlaka, njihov izbor je manje-više uvek kompromis između najčešće protivrečnih, a ponekad i suprotnih mehaničkih ili hemijskih osobina. Na primer, jedna od najznačajnijih mehaničkih osobina prevlaka, to jest njihova povećana tvrdoća i otpornost na habanje, je faktor koji može da izazove pogoršanje njihove duktilnosti i da izazove krte lomove [13, 14]. Da bi se prevazišlo ovo ograničenje predložene su i razvijene višeslojne prevlake [13, 14]. Višeslojne prevlake imaju poboljšanu otpronost na lom, a imaju istu tvrdoću kao i jednoslojne prevlake. Sa druge strane, ostale osobine, kao zadovoljavajuća adhezija, poboljšana otpornost na habanje, hemijska inertnost i nizak koeficijent trenja,

mogu se ostvariti kombinovanjem različitih osobina pojedinačnih slojeva u višeslojnoj prevlaci [15, 16, 17].

Višeslojne prevlake, što se tiče njihove tehnike proizvodnje, mogu biti strukturalne ili kompozitne. Prva grupa obuhvata prevlake sa geometrijski i mehanički razdvojenim slojevima, sa jasnim graničnim površinama (interfejsima) između njih. S druge strane, kompozitne višeslojne prevlake ispoljavaju postepenu promenu sastava po debljinama, kao posledica toga, imaju kontinualnu promenu mehaničkih osobina. Međutim, obe vrste su dobre alternative jednoslojnim prevlakama, i izazivaju veliko interesovanje i istraživača i industrije.

Nešto modernije varijacije jednoslojnih metoda se razvijaju ako se povećanje naslage tvrdog materijala prekine vrlo tankim slojem nekog materijala. U ovom slučaju stvara se MNBL - Dvoslojna prevlaka višestruke nanostrukture. Vrlo fini metod za nanošenje finih višeslojnih prevlaka je korišćenje dva ili više isparivača sa različitim materijalima meta. Štaviše, super-rešetke mogu biti rešenje za budućnost. Ovde je debljina pojedinačnih slojeva reda veličine svega nekoliko atomskih rastojanja i mogu se javiti potpuno nove osobine. Na slici 3 su sumirane ovde predstavljene strategije za nanošenje višeslojnih prevlaka.

| FILM TEXTURE | COATING TYPE | TYPICAL FILMS |
|-----------------|---|--|
| | Monolayer coatings | $t = 0.5 - 50 \mu\text{m}$ TiN, CrN, ... |
| | Multilayer Compositional Coatings | $t = 0.5 - 10 \mu\text{m}$ ALOX, TiCN+C... |
| | Multilayer Structural Coatings | $t = 0.5 - 10 \mu\text{m}$ SUPERTIN... |
| | Nanostructure Bi-layer Coatings | $t = 0.1 - 0.5 \mu\text{m}$ |
| | Nanolayer Structural Coatings | $t = 10 - 100 \text{ nm}$ |
| | Superlattice Structural Coatings | $t = \text{few atomic cells}$ |

Slika 3. Tipične strukture jednoslojnih i višeslojnih prevlaka i relativnih komercijalnih filmova

Prevlake igraju manje-više pasivnu ulogu prilikom rada. Na primer, u procesu struganja sa konitnualnim skidanjem materijala, super tvrda prevlaka štiti osnovni materijal, zbog toga što ima usporen razvoj procesa habanja. Abrazivno oštećenje prevlake označava kraj njene zaštitne namene. Još mnogo prefinjeniji tanki zaštitni filmovi rade sa aktivnom materijom, formirajući zaštitni super tanki sloj, koji reaguje sa elementima rezogn komada, time štiteći samu prevlaku [18, 19].

Osim procesa nanošenja i osobina materijala od koga se pravi film, dominantan parametar, koji ima odlučujući uticaj na ponašanje sistema sa prevlakama, je prethodna obrada osnovnog materijala. Sprovedena su mnoga eksperimentalna i teorijska izražavanja o uticajima neravnina i tehnikama mikro-udara na adheziju filma i opšte osobine [20, 21, 22, 84, 85, 86]. U narednom odeljku, analiziraju se karakterizacija filma i osobine, uz ilustraciju prednosti i nedostataka svake od metoda za procenu kvaliteta prevlaka.

2. OSNOVNA KONTROLA KVALITETA PREVLAKA

Zaključni faktor za početno prihvatanje realizovanog sistema sa prevlakama je da udovolji nekim zahtevima koji su dobijeni na osnovu vrlo poznatih testova. Najznačajniji od njih su prikazani na slici 4.

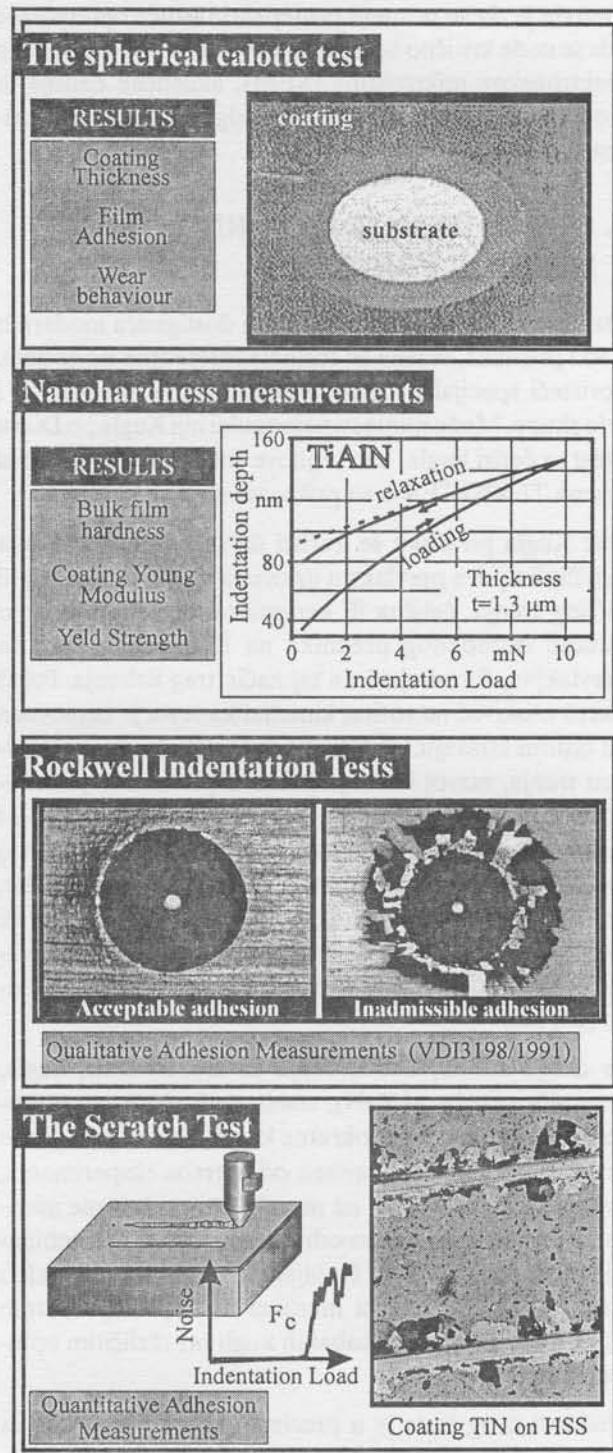
Mora se napomenuti da većina eksperimentalnih rezultata koje daju ovi testovi su manje ili više kvalitativni i uglavnom nude uporedne informacije koje se tiču superiornosti jednog sistema u odnosu na drugi pod istim uslovima [23]. Kako se dalje analizira, osobine koje su dobijene ovim testovima odnose se ili na geometrijske parametre (debljina) ili tehnološke parametre (čvrstoća unutar osnovnog materijala, itd.).

Analiza kratera kuglice (otiska) omogućava zaključke o tvrdoći i adheziji prevlake. Kada se doda držać oblika četvorostранje piramide, rotirajuća čelična kuglica struže sferni konkavni otisak kroz materijal prevlake u osnovnom materijalu. Za ravne uzorce i sferne površine ovo rezultuje kružnom površinom, dok se kod konveksnih površina dobija eliptična površina otiska. Debljina prevlake se može dobiti merenjem pod mikroskopom kruga ili elipse, respektivno. Interfejs između prevlake i osnovnog materijala pokazuje kvalitet adhezije prevlake [24].

Jedan od najvažnijih parametara koji se testiraju je tvrdoća materijala prevlake. Ova osobina predstavlja čvrstoću materijala na spolja izazvane plastične deformacije, i najčešće pokazuje otpornost na habanje i krutost prevlake. Merenja tvrdoće materijala prevlake predstavlja težak zadatak, pošto treba uzeti u obzir pravilo o 1/10 koje pokazuje da film treba da bude bar deset puta deblji od dubine otiska. Zbog toga se za vrlo tanke filmove meri nano-tvrdoća, koja daje rezultate (putanja

relaksacije opterećenja otiska), slično onima prikazanim na slici 4. Osim tvrdoće materijala, dobijaju se i modul elastičnosti i granica tečenja otiska [25, 26, 27, 28].

Rokvelov test utiskivanja, prema VDI pokazateljima, omogućuje brz zaključak o adheziji prevlake, izazivajući napone i znatne plastične deformacije u površini koja se ispituje [29]. Normalno, prevlaka je utiskivačem oštećena u zoni oko otiska. Stepen oštećenja, to jest izgled prslina ili ljuštenja prevlake se zatim ocenjuje. Na slici 4



Slika 4. Elementarni testovi korišćeni za karakterizaciju kvaliteta PVD prevlaka

su prikazana dva testa, koji ilustruju dobro i loše prijemanje prevlake.

Konačno, adhezija prevlake se obično ocenjuje i pomoću testa grebanja. Četverostrana piramida definisane geometrije zatrebuje površinom pri određenom opterećenju i onda se ocenjuju nastala oštećenja. Najvažniji parametar je primjeno opterećenje na ispitivani materijal. Za adheziju prevlake se smatraju dobrim vrednostima opterećenja u opsegu od 60 do 100 N, zavisno od osnovnog materijala i materijala prevlake. Jedna varijacija ovog metoda je da se primeni postepeno rastuće opterećenje i da se nađe kritično opterećenje F_c pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM), akustične emisije ili trodimenzionalnim zapisom sile odgovarajućim senzorima [30, 31].

3. ODREDJIVANJE OTPORNOSTI NA HABANJE PREVLAKE

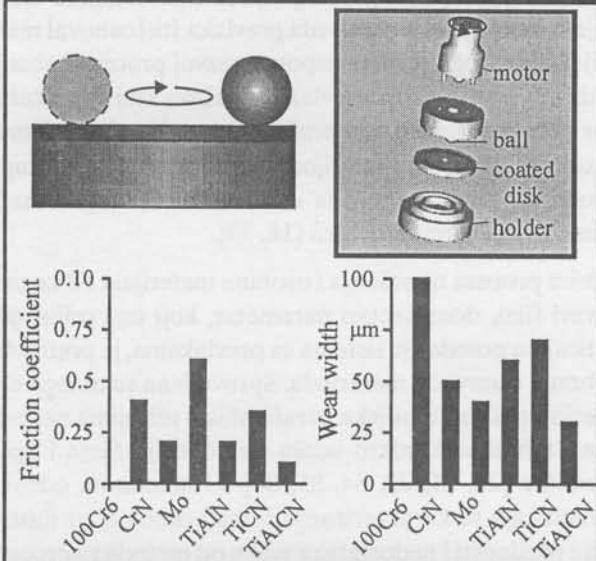
Da bi se okaraketrirala tribološka dostignuća modernih PVD prevlaka, vršena su različita referentna ispitivanja, koristeći specijalne optitne stolove visoke preciznosti i vrlo skupe. Među njima su najpopularniji Kugla po Disku i test sa četiri kugle, kao i njihove varijacije. Ovi principi prema TEKNIKER-u su prikazani na slici 5 [32, 33].

Test Kugla po disku se koristi da se odredi ponašanje različitih tipova prevlaka u uslovima suvog, polusuvog ili tečnog trenja. čelična ili keramička kugla se kreće po putanji određenog prečnika na fiksiranom disku sa prevlakom, formirajući na taj način trag habanja. Pošto sferni utiskivač ne rotira, kinematika testa je zasnovana na čistom klizanju. Primena ovog metoda daje koeficijent trenja, razvoj habanja preko zapreminske pohabnosti kugle i zapreminske pohabnosti diska. Tipični rezultati ovog testa su takođe prikazani na slici 5. Ovaj test je varijacija poznatog testa na habanje Pin-on-Disc, koji koristi pin zaobljenog vrha umesto keramičke ili čelične kuglice. Ovaj test se uspešno koristi za određivanje otpornosti na habanje materijala koji nemaju prevlaku [34, 35].

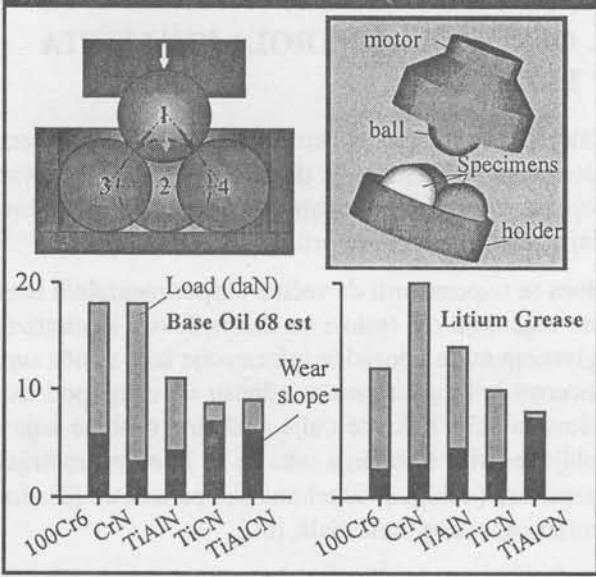
Sa druge strane, kod uređaja za test sa četiri kugle, keramička kugla od Si_3N_4 , stabilno učvršćena na postolje, rotira preko tri nepokretne kugle, koje su prevučene različitim filmovima. Zavisno od potreba eksperimenta, ove tri kugle mogu, ali ne moraju biti prekrivene mazivom. Ovaj test osigurava određivanje najbolje kombinacije prevlaka i maziva. Dobijeni rezultati su minimalno opterećenje, koje izaziva merljivo habanje nepokretnih kugli, kao i prečnik pohabanih kugli pri različitim opterećenjima.

Prednost ovog testa je u preciznom određivanju otiska habanja, pošto je, prema Hercovoj teoriji, kontakt između dve kugle krug. Usled sinhronizovanog ispitivanja tri različita tipa prevlake, pod potpuno istim uslovima, test

Principle of the Ball on Disk Tribological Test



Principle of the Four Ball Tribological Test



Slika 5. Tipični referentni tribološki testovi prevlaka prema TEKNIKER-u

pruža i dobre uporedne informacije u pogledu izmerenih prečnika i dubina tragova habanja [32, 33].

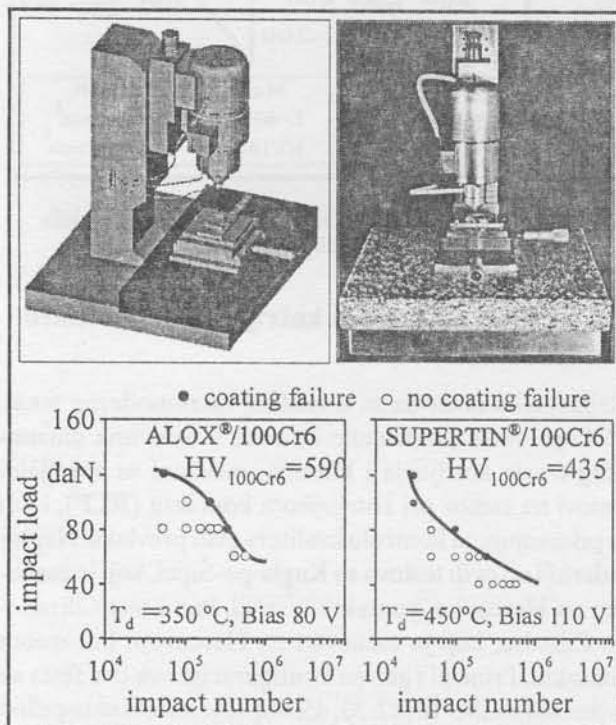
4. KVANTITATIVNO ODREDJIVANJE RADNOG VEKA PREVLAKA NA ZAMOR

4.1. Test na udar i dobijeni Smith-ovi i Woehler-ovi dijagrami za jednoslojne i višeslojne prevlake

Široka primena tankih tvrdih PVD prevlaka u praksi, koja izaziva stanja velikih dinamičkih naponi, kao kod reznih alata, ležajeva itd., dovodi do potrebe preciznog određivanja čvrstoće na zamor za prevlaku. Tako određeni kritični naponi se mogu iskoristiti da se obezbede

radni uslovi u bezbednom opsegu, uzimajući u obzir trajnu čvrstoću prevlake. Uveden je test prevlake na udar, kao pogodna metoda za kvantitativno određivanje ponašanja na zamor kombinacije prevlaka-osnovni materijal, u formi opšte primenljivih dijagrama [36, 37].

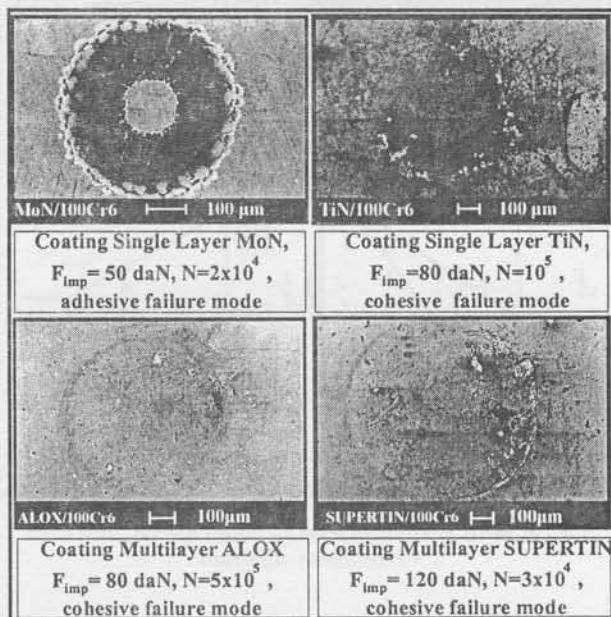
U toku testa ravna površina prevučenog uzorka se opterećuje ponovljenim udarima tvrdom kuglicom od složenog karbida. Kretanje loptastog utiskivača ka uzorku je prouzrokovano Laplace-ovom magnetnom silom koju izaziva elektromagnetno polje odgovarajućeg kalema. Slika 6 prikazuje 3-D model uređaja za testiranje na udar, kao i fotografiju stvarnog uređaja. Registrovanjem broja udara koji izaziva oštećenje prevlake, za svako primenjeno kontaktno opterećenje, dolazi se do dijagrama sličnih uobičajenim dijogramima zámora, na kojima je opterećenje dato u funkciji broja ponovljenih udara koje prevlaka može da izdrži bez oštećenja. Ovi dijagrami su dati na slići 6, za višeslojnu kompozitnu prevlaku (ALOX[®]) i strukturalnu prevlaku (TiNALOX[®]).



Slika 6. Uredaj za testiranje prevlake na udar i dijagrami sile - broj udara za jednu višeslojnu kompozitnu i jednu strukturalnu prevlaku

Oštećenje prevlake i prekid svakog pojedinačnog eksperimenta su određeni početkom opuštanja karakteristične unutrašnje povezanosti ili razaranja adhezije po interfejsu. Zbog toga, zamorno oštećenje prevlake može biti ili koheziono, to jest opuštanjem unutrašnjih veza a zatim kidanjem, ili adheziono, to jest razdvojnim lomom na interfejsu i zatim makro delaminacijom. Mehanizmi oštećenja su znatno komplikovaniji za višeslojne prevlake, pošto je odgovarajuće polje napona određeno strukturom materijala u kompleksnoj strukturi slojeva [38, 39].

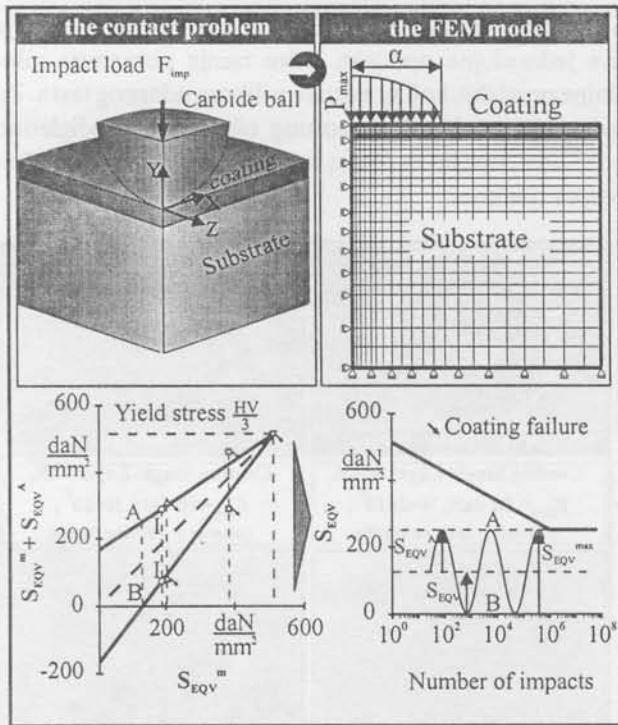
Mikroografi na slici 7 ilustruju tipične vidove oštećenja dve jednoslojne prevlake i dve ranije pomenute višeslojne prevlake, koji su nastali prilikom udarnog testa. Za jedan sloj MoN vid zamornog oštećenja je očigledno adhezionali, dok su za ostale tipove prevlaka modovi oštećenja kohezionali.



Slika 7. Tipični oblici oštećenja različitih tipova prevlaka koji su nastali pri testu na udar

Kvazi statička simulacija metodom konačnih elemenata ovog testa je prikazana u gornjem delu slike 8, a urađena je sa dva koraka opterećenja [40, 41, 42]. Prvi korak opterećenja, takozvano stanje opterećenja, predstavlja period u kome je opterećenje primenjeno na prevučenu površinu. U toku drugog koraka (stanje relaksacije), raspodela pritisaka je uklonjena i samo potencijal naponskog polja dovodi do elastičnog oporavka. U cilju dostizanja visokih vrednosti napona prevlake, primenjuju se znatna opterećenja na prevučene uzorke, koja prouzrokuju intenzivnu plastičnu deformaciju osnovnog materijala - čelika. Na ovaj način, u toku procesa relaksacije dok se utiskivač kreće navise, mogu se uočiti zaostale deformacije osnovnog materijala, što prouzrokuje da prevlaka ostaje deformisana.

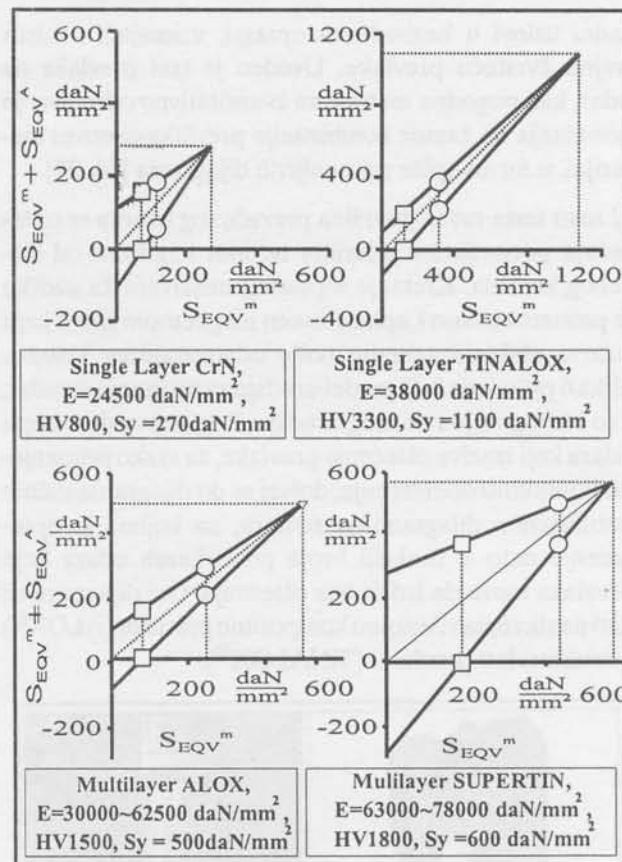
Zamorno ponašanje prevlaka se može izraziti Smithovim dijagramom kritičnih komponenata napona za kohezionali vid oštećenja, to jest Mises-ovim naponima koji obezbeđuju njihovu trajnu postojanost, kako je pokazano na donjem delu slike 8. Usled nedostatka trajne deformacije u većini slučajeva u praksi, kao što je u primeni kod ležišta i pri glodanju, prevlaka se deformeše čisto elastično u toku faze rezanja i potpuno se oporavlja na početni položaj na kraju kontakta sa radnim komadom. Iz ovog razloga zamorna čvrstoća prevlake koja obezbeđuje trajnu postojanost, se dobija iz dela A-B Smithovog dijagrama pri minimalnom naponu jednakom nuli.



Slika 8. MKE simulacija testa na udar i tipičan Smith-ov i Woehler-ov dijagram

Ovi dijagrami, Smith-ov i Woehler-ov, su dobijeni za veliki broj različitih prevlaka, i na slici 9 su prikazani tipični Smith-ovi dijagrami za meku jednoslojnu prevlaku (CrN), super tvrdi jednoslojnu prevlaku (TINALOX®), višeslojnu kompozitnu prevlaku (ALOX®) i višeslojnu strukturalnu prevlaku (SUPERTIN®). Mora se napomenuti da zamorno ponašanje takođe zavisi i od osobina osnovnog materijala i od modula elastičnosti prevlake [43, 44]. Zbog toga su granice napona dobijene iz Smith-ovog dijagrama za CrN relativno niske, ali je i nizak modul elastičnosti ove prevlake odgovoran za nastajanje ograničenih napona za određeno spoljašnje opterećenje. Sa ovog aspekta, TINALOX® prevlaka je jedna od najpoželjnijih, pošto ona ima relativno nizak modul elastičnosti, što prouzrokuje nastanak niskih napona, uz visoku tvrdoću, što je garancija za dobru otpornost na habanje. Ovo ponašanje je potvrđeno eksperimentima rezanja.

Sadašnja ispitivanja su usmerena ka razvoju uređaja za testiranje koji bi omogućio i test na udar i softver za ocenu pomoću koga bi brzo mogao da se odredi vek trajanja prevlake, u formi Smith-ovog dijagrama [45, 46]. Test na udar prevlake je jedini referentni test koji može da kvantitativno izradi zamorno ponašanje tankih površinskih filmova, mada se on može još koristiti za karakterizaciju ponašanja površina, čak i homogenih materijala, koje su na primer izložene povišenim temperaturama, završnoj termičkoj obradi, i slično.



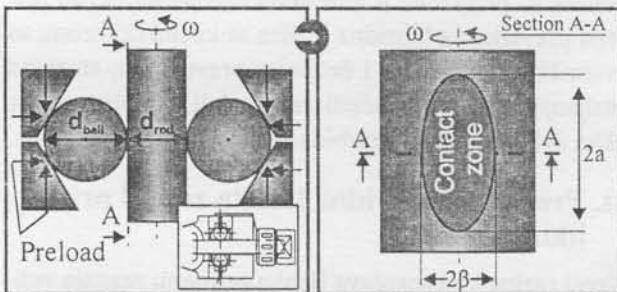
Slika 9. Smith-ovi dijagrami reprezentativnih jednoslojnih i višeslojnih prevlaka

4.2. Test na zamor pri kotrljajnom kontaktu (RCF-test)

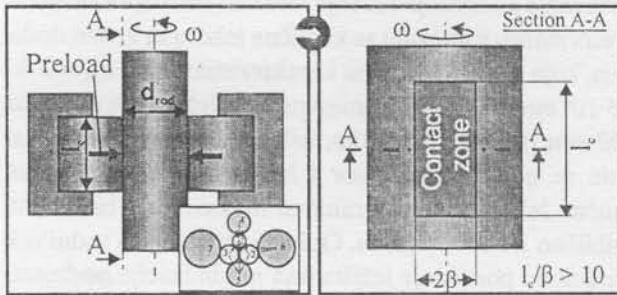
Uzimajući u obzir da su u znatnoj meri moderne tanke PVD prevlake predviđene da rade u uslovima dinamičkog trenja kotrljanja i klizanja, razvijeni su specijalni testovi na zamor pri kotrljajnom kontaktu (RCF), i oni se primenjuju za kontrolu kvaliteta ovih prevlaka. Najpopularniji od ovih testova su Kugla-po-Šipci, koji je zasnovan na Hercovom kontaktu u tački, kao i test Cilindar-po-Cilindru, koji je zasnovan na Hercovom linearном kontaktu. Principi i glavne konfiguracije ova dva testa su prikazani na slici 10 [32, 33, 45, 46]. Ovi testovi se uspešno simuliraju FEM metodama, u cilju da se izvrši njihova optimizacija, ili da se dobiju kritični naponi koji se odnose na zamor prevlaka [47, 48].

Kao primer, da bi se odredio napon koji izaziva zamorno oštećenje prevlake u toku dugotrajnih RCF testova, urađena je MKE simulacija testa Kugla-po-Šipci. Primenjeni postupak modeliranja je pokazan na gornjem delu slike 11. Pri kontaktnim uslovima u tački, koji nastaju kada se kugla kotrlja duž šipke, formira se kontaktna elipsa, koja je projekcija konveksne ili konkavne kontaktne površine u ravni normalnoj na osu opterećenja, kako je već pokazano na gornjem delu slike 10. Površinska tvrda prevlaka ne utiče na dimenzije kontaktne površine, usled svoje radikalno male debljine i malog odnosa mo-

The ball on rod point contact RCF test



The cylinder on cylinder linear contact RCF test



Slika 10. Principi i geometrija kontakta za tipični RCF test sa kontaktom u tački i po liniji

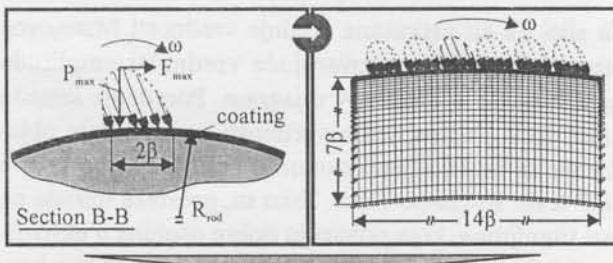
dula elastičnosti prevlake i osnovnog materijala, koji čak i za kruću ispitivanu prevlaku TiAlN, ne prelazi vrednost 4 [49]. U toku ovih testova, prevučene šipke od čelika 100Cr6 su bile izložene kotrljajnim kontaktnim opterećenjima, u namjeri da se prouzrokuje zamorno oštećenje prevlake. Nivo opterećenja je održavan konstantnim, da bi se dobole uporedive vrednosti za različite prevlake. Simulacioni model se sastoji od izoparametarskih elemenata koji imaju konfiguraciju ravanskog stanja deformacije, i koji su finiji bliže kontaktnoj zoni.

Da bi se ubrazao test, primjenjuje se intenzivno kontaktno opterećenje i nastaje plastična deformacija osnovnog čeličnog materijala. Usled ove činjenica MKE simulacija testa tretira taknu tvrdu PVD prevlaku kao čisto elastičnu, a osnovni materijal - čelik kao elastično-plastičan, pretpostavljajući multilinearni kinematički zakon ojačanja [50, 51, 52]. Uslovi kotrljajnog kontakta su postignuti delovanjem prelaznog normalnog pritiska i tangencijalnih raspodela pritiska.

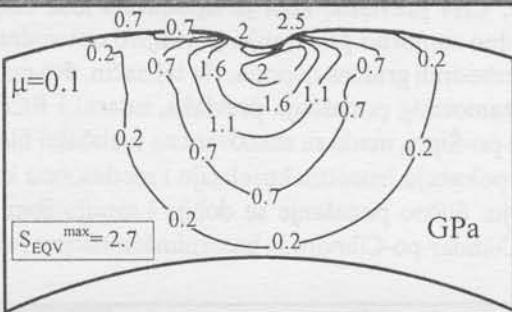
Usled male debljine prevlake, u poređenju sa poluosama kontaktne elipse α i β , trodimenzionalni problem je redukovani na problem ravanskog stanja deformacije, koji povoljno predstavlja naponska stanja koja nastaju u poprečnom preseku, vertikalno na pravac kotrljanja, koji prolazi kroz manju osu kontaktne elipse.

Kvazi-statička simulacija RCF testa je postignuta povećanjem prenosne površinske raspodele pritisaka u diskretnim koracima. Svaki prenos je činio jedan korak, koji je trebalo da bude rešen, imajući početne vrednosti koje

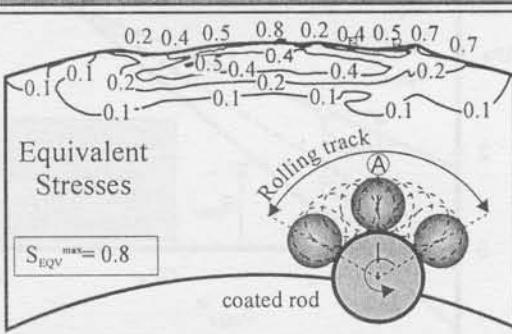
Simulation of the ball on rod RCF test



Coating TiAlN, position A loaded, steady state



Coating TiAlN, position A relaxed, steady state



Slika 11. MKE model RCF testa Kugla-po-Šipci i Mizesovi rezultati za opterećen i rasterećen uzorak

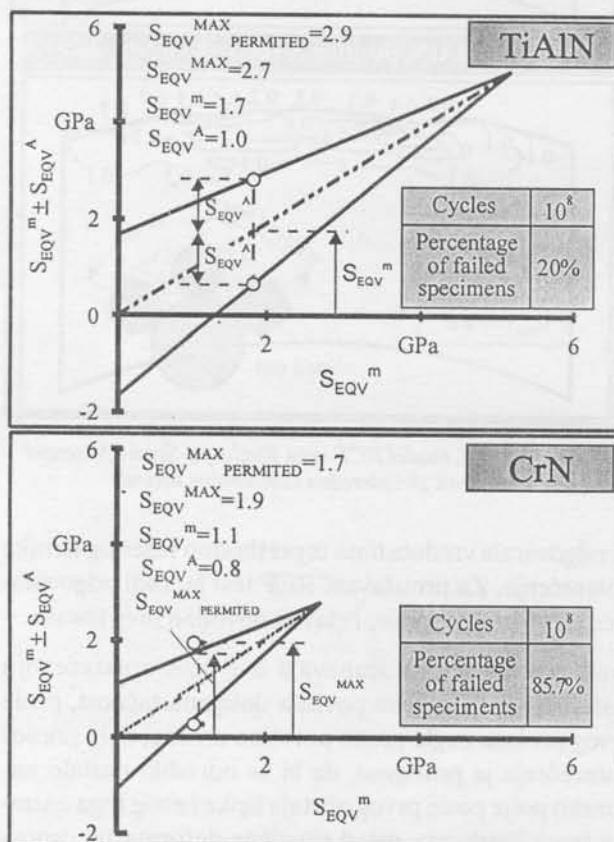
su odgovarale vrednostima iz prethodno rešenog koraka opterećenja. Za proučavani RCF test je, radi odgovarajuće tačnosti simulacije, rešavan dovoljan broj koraka.

Svaki položaj se proračunava u dve faze, opterećenoj i rasterećenoj. Da bi se povišila dobijena tačnost, posle prvog prolaza kugle preko površine uzorka, dalji prenos opterećenja je postignut, da bi se odredilo nastalo naponsko polje posle prvog obrtaja šipke i zbog toga nastalog traga kotrljanja, usled plastične deformacije osnovnog materijala šipke.

Štaviše, donji deo slike 11 ilustruje opterećeno i rasterećeno stanje napona u toku drugog obrtaja šipke za srednji položaj razvijenog traga kotrljanja. Ova reprezentativna stanja pokazuju raspodele stacionarnog napona posle formiranja staze kotrljanja. Promena napona sa opterećenog na neopterećeno stanje ima minimalnu vrednost nula, usled plastične deformacije osnovnog materijala - čelika, koje teži da zadrži prevlaku deformisati.

nom, i koristi se za predviđanje zamora prevlake, kroz korišćenje odgovarajućeg Smith-ovog dijagrama.

Na slici 12 su prikazane srednje vrednosti Mizesovog napona S_{EQV}^m i odgovarajuće vrednosti amplituda S_{EQV}^A unete u Smith-ov dijagram. Poređenje između izračunatih i dozvoljenih vrednosti napona daje objašnjenje za ustanovljeno zamorno ponašanje prevlake u RCF testu Kugla-po-Šipci. Tako su, prevlake nastale na bazi titanijuma, koje pokazuju dobre osobine u eksperimentalnim uslovima rada, bile opterećene blisko bezbednim granicama napona, ali unutar njih. Sa druge strane, CrN prevlaka, koja je ispoljavala loše eksperimentalno zamorno ponašanje, je vidljivo opterećena izvan bezbednih granica napona. Na taj način, dva različita testa zamornog ponašanja prevlaka, udarni i RCF test Kugla-po-Šipci, mada su zasnovani na različitim filozofijama, pokazuju izuzetnu korelaciju i međusobnu komunikaciju. Slično ponašanje se dobija i simulacijom RCF testa Cilindar-po-Cilindru sa linearnim kontaktom [45, 46].



Slika 12. Promena Mizesovog napona za vreme RCF testa u susednim Smith-ovim dijagramima

5. BUDUĆI TREND OVNI I INOVIRANJE KONTAKTNIH APLIKACIJA

Nova generacija modernih PVD prevlaka, koje se mogu nanositi na niskim temperaturama, ima danas jako poboljšane osobine materijala, koje se mogu tačno odrediti, kako je objašnjeno u prethodnim odeljcima. Uvedene

su, dakle, nove primene prevlaka, pružajući veliku evoluciju, posebno u proizvodnoj tehnologiji. Dva tipična primera su prikazana u narednim odeljcima. To su primena prevlaka na hibridna ležišta sa kosim dodirom, sa keramičkim kuglicama i čeličnim prevučenim stazama kotrljanja, kao i prevučeni rezni alati od brzoreznog čelika ili kompleksnog karbida kao osnovnog materijala.

5.1. Prevučena hibridna ležišta za rad pri velikim brzinama

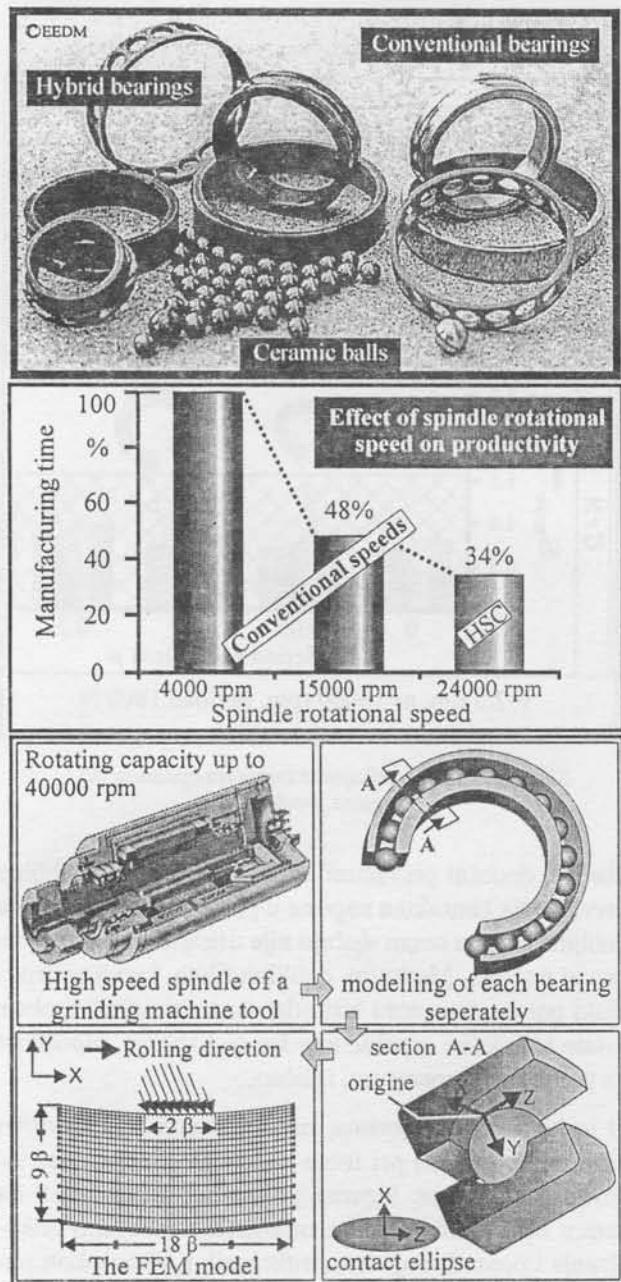
Glavni razlog koji sprečava široku primenu rezanja velikim brzinama je rad sistema vretena alatne mašine, usled nedostatka brzine konvencionalnih ležišta. Kao rezultat povećanja korišćenja rezanja visokim brzinama i visokih preformansi, zahtevaju se kuglična ležišta sa kosim dodirom, koja dostižu brzinsku karakteristiku od $n \cdot d_m = 2$ do $2.5 \cdot 10^6 \text{ mm/min}$, pri prečniku prvrta ležaja d_m od 50 do 100 mm [53, 54]. Međutim, usled njihovih performansi koje se odnose na zamor i habanje, konvencionalna čelična ležišta imaju ograničenu maksimalnu brzinu na približno $1.7 \cdot 10^6 \text{ mm/min}$. Odlučujući uticaj na radni vek i frikciono ponašanje ležišta ima minimizacija podmazivanja, koja je poželjna u cilju smanjivanja disipacije snaže i temperature vretena. Da bi se prevazišle ove potешkoće, predložene su alternativne vrste ležišta, takozvana hibridna ležišta sa keramičkim kuglicama (Si_3N_4), ili potpuno keramička ležišta [54]. Ovo je dovelo do značajnog poboljšanja rotacionog kapaciteta ležišta, kao rezultat redukcije gustine kotrlajnih elemenata, a time i centrifugalnih sila. Tako hibridna ležišta doprinose opštoj krutosati vretena alatne mašine, usled većeg modula elastičnosti njihovih kotrlajnih elemenata. Međutim, performanse ovakvih ležišta su ograničene tribološkim ponašanjem njihovih konvencionalnih čeličnih kotrlajnih staza.

PVD procesi na niskim temperaturama omogućili su primenu hibridnih kotrlajnih ležišta sa keramičkim kuglicama i prevučenim čeličnim prstenovima, poboljšavajući time njihovo tribološko ponašanje, i smanjujući potrebnu količinu maziva, radnu temperaturu, kao i nivo buke. Uzimajući u obzir proširenu primenljivost PVD procesa, predloženo je i ostvareno površinsko poboljšanje čeličnih kotrlajnih staza, pomoću tankih tvrdih prevlaka [55, 56]. Gornji deo slike 13 prikazuje ovaj novi tip ležišta zajedno sa konvencionalnim ležištima istih dimenzija. Ovakva ležišta omogućavaju izuzetno povećanje produktivnosti alatnih mašina, kako je prikazano na srednjem dijagramu na istoj slici.

Za vreme stadijuma evolucije hibridnih ležišta sa keramičkim kuglicama i prevučenim kotrlajnim stazama, ispitivano je i optimizirano nekoliko konstrukcijskih parametara. Najznačajniji su: geometrija, parametri PVD procesa, termička obrada osnovnog materijala, i nanošenje prevlake na materijale. Da bi se razjasnilo da li je

oštećenje prevlake u nekim početnim eksperimentima nastalo usled pojave prevremenog loma, ili nije, zahteva se precizno poznavanje nivoa dinamičkih napona u primjenjenim radnim uslovima. Da bi se rešio ovaj problem, primjenjen je model radnog veka prevlake na zamor, uz istovremenu simulaciju MKE najugroženijih kontaktnih položaja, koji nastaju između kuglica i kotrljajne staze, u toku rada ležišta.

Postupak MKE modeliranja je prikazan na donjem delu slike 13. Proračun se odnosi na kontaktni problem između keramičkih kotrljajnih elemenata i prevučene spoljašnje kotrljajne staze. Usled simetrije opterećenja u ležištima sa kosim dodirom, pošto deluju samo aksijalno



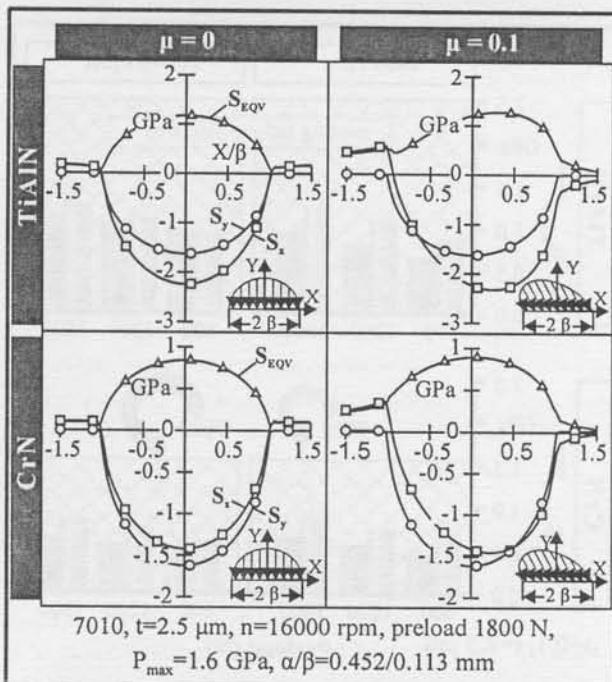
Slika 13. Hibridna ležišta sa prevučenim kotrljajnim stazama, koristi od njihovog uspešnog rada i postupak njihovog modeliranja MKE

predopterećenje i inercijalno opterećenje, svaki kontaktni položaj je identičan sa ostalima. MKE rešenje takođe uzima u obzir i efekte trenja koji utiču znatno na kruće prevlake.

Razvijen model ravanskog stanja deformacije je ugrađen, pomoću umnožaka manje poluose kontaktnе elipse β , tako da je finiji bliže kontaktom položaju. Kotrljanje je simulirano primenom raspodele normalnog Herzogov eliptičnog pritiska, maksimalne vrednosti P_{max} , na prevučenu površinu, dok je klizanje simulirano tangencijalnim pritiskom. Vektori tangencijalnog pritiska su proporcionalni vektorima normalnog pritiska, uz koeficijent trenja μ . Kontaktna opterećenja su izračunata uz pomoć digitalnog programa koji izvodi kvazi-statičku simulaciju rada ležišta, uzimajući u obzir trenje, centrifugalne sile i žiroskopske momente [57, 58].

U proračunu sila i momenata trenja, osim opterećenja Q_i i Q_c , uzete su u obzir i kinematske veličine kao što su brzine klizanja i obrtanja, itd. Kontaktna opterećenja, zajedno sa postojećom geometrijom kontakta, su korišćena za izračunavanje maksimalnog kontaktognog pritiska i odgovarajućih dimenzija kontaktne elipse, i za unutrašnje i za spoljašnje prstenove.

Slika 14 prikazuje površinsku raspodelu različitih komponenata napona za hibridno ležište 7010, pri istom predopterećenju, za slučajeve najkruće ispitivane prevlake TiAlN i najmekše prevlake CrN. Kao što je i očekivano, trenje povećava nivo napona, a usled toga i opasnost od zamora. Ovde predstavljene komponente napona su potencijalne za kohezioni vid oštećenja, to jest, to su normalni naponi koji nastaju u prevlaci za vreme rada

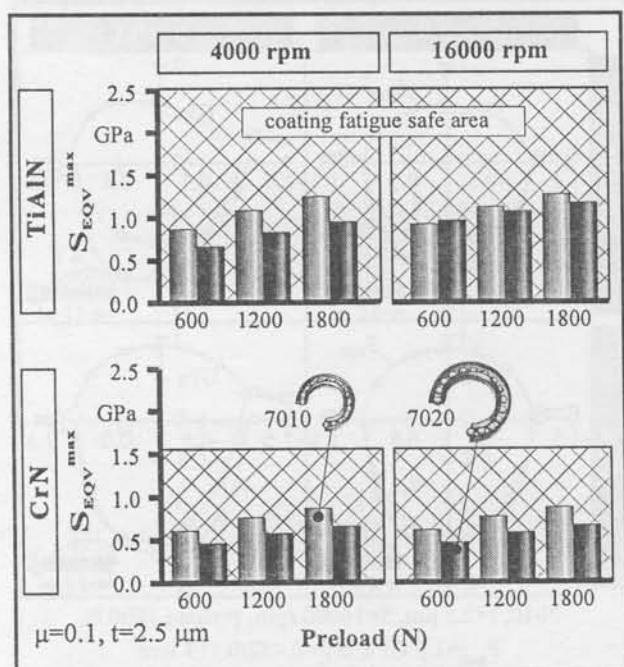


Slika 14. Raspodela komponenti napona u prevlaci koje se javljaju pri radu ležišta

ležišta. Poređenje vrednosti napona za TiAlN i CrN prevlake pokazuje da, pod jednakim predopterećenjem, pa prema tome i kontaktnim opterećenjem, meka prevlaka ima niže vrednosti napona, imajući sa druge strane, istu raspodelu napona kao i kruća prevlaka. Maksimalne vrednosti ovih raspodela napona diktiraju granice promena napona pošto su prevlake opterećene između ovih najvećih opterećenja i nule, kada se svaki kotrlajni elemenat udaljava od ispitivanog položaja.

Maksimalne vrednosti Mises-ovog napona, koje su dobijene primenom ranije opisanog postupka uz pomoć MKE, su upoređene sa vrednostima bezbednih granica zamora, koje su dobijene pomoću Woehler-ovog dijagrama za odgovarajuću prevlaku, za kohezionali mod oštećenja. U slučaju ispitivanih ležišta, usled elastične deformacije kontaktnog materijala, površina Smith-ovog dijagrama, koja služi za predviđanje zamora, je ona sa minimalnom vrednošću napona jednakom nuli.

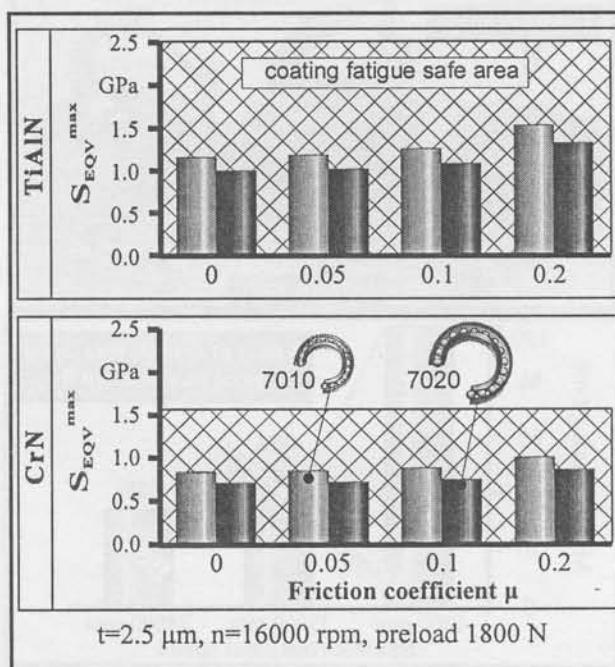
Slika 15 pokazuje očekivanja u pogledu zamora za obe ispitivane prevlake, kao funkcije obrtne brzine vretena i predopterećenja, u dva elastična slučaja, to jest, za ležište 7010 sa prečnikom sklapanja od 50 mm, i ležišta 7020 sa prečnikom od 100 mm. Šrafirana oblast na svakom dijagramu odgovara naponima koji su povezani sa trajnom postojanošću prevlake. Povećanje obrtne brzine izaziva povećanje opasnosti od zamora, usled uticaja centrifugalnih sila. Ovaj uticaj je mnogo očigledniji za slučaj ležišta 7020, usled većeg prečnika i zbog toga povećane mase kotrlajnih elemenata. Na račun toga, za isti nivo aksijalnog predopterećenja, čak i pri manjim brzinama u velikom ležištu 7020 nastaju manji naponi, a za veće obrtne brzine situacija je suprotna.



Slika 15. Uticaj aksijalnog predopterećenja i obrtne brzine na rizik od zamora prevlake.

Sa druge strane, porast predopterećenja dovodi do povećanja nastalih napona. Ova primedba postaje očiglednija u slučaju malog ležišta. Razlozi za ovo su isti kao i za slučaj sa prethodne slike, pošto manji radijus krivine kontaktnih tela i manji broj kotrlajnih elemenata, koji karakterišu manje ležište, su u vezi sa višim kontaktnim naponima [59, 60].

Slika 16 prikazuje uticaj koeficijenta trenja na napone prevlake na zamor. Kako se može videti sa dijagrama, tvrda prevlaka je osjetljivija na vučenje, i opasnost od zamora se povećava u skladu sa koeficijentom trenja. Za optimizirane uslove rada ležišta, koeficijent trenja ne prelazi vrednost od 0.1. Veće vrednosti trenja su prouzrokovane lokalnim geometrijskim nepravilnostima i povećanom hrapavošću.



Slika 16. Uticaj koeficijenta trenja na opasnost od zamora prevlake

Štaviše, dodatni proračuni objašnjavaju uticaj debljine prevlake na kontaktne napone u prevlaci, pokazujući da debljina filma u ovom slučaju nije uticajni parametar na razvoj napona. Međutim, debljina filma, kao konstrukcijski parametar, mora biti odabrana uzimajući u obzir ostale tribološke aspekte kao što su habanje, otpornost na povišene temperature, i slično.

U ispitivanim slučajevima, prevlake rade u bezbednim granicama, imajući pri tome zadovoljavajući stepen sigurnosti na zamor. Siguran pokazatelj bezbednosti na zamor ispitivanih prevlaka, omogućava umereno prikazivanje i prosudjivanje konstrukcionih i tehnoloških parametara koji su imali značajan uticaj na nastajanje oštećenja prevlake. U toku faze evolucije tipa hibridnih ležišta sa keramičkim kuglicama i prevučenim kotrlajnim elemenatima, prevlaka je uvek bila u bezbednim granicama.

Ijajnim stazama, ispitivano je i optimizirano nekoliko konstrukcijskih parametara. Većina značajnih parametara su geometrija, parametri PVD postupka, termička obrada osnovnog materijala i materijala prevlake.

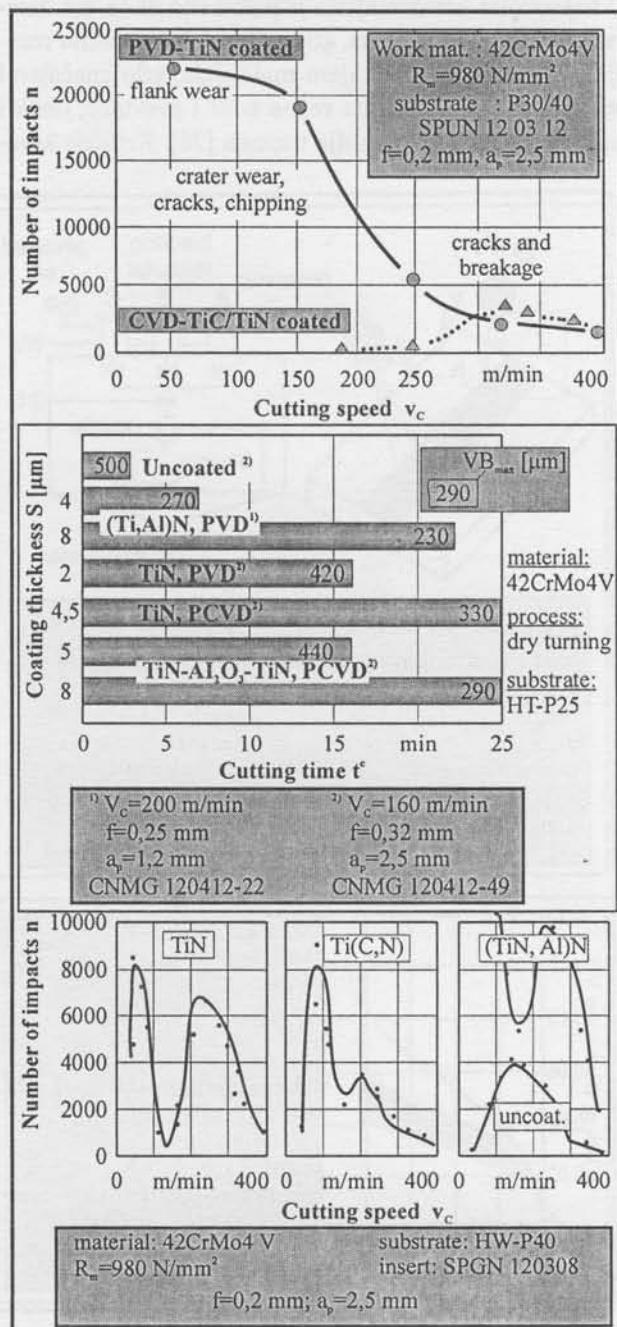
U toku dugotrajnog i potpunog rada ležišta u specijalnom uređaju za ispitivanje, kao i brzohodih električnih vretna, nailazilo se na mnoge probleme, [61, 62, 63], što za krajnji rezultat ima lom prevlaka. Ležišta su testirana, pri čemu su aksijalno predopterećenje i inercija bili jedina opterećenja. Uticaj nekontrolisanog žarenja u komori za nanošenje prevlake, usled činjenice da je početno temperatura nanošenja bila viša nego temperatura žarenja osnovnog materijala, je bio očigledan na odstupanje zabljenosti i karakterističniji je za spoljašnji prsten, koji je bio manje krut zbog njegovih većih dimenzija. S druge strane, tipična oštećenja CrN prevlaka su prouzrokovana lošim kvalitetom površine i povećanom hrapavošću kotrlajne staze ležišta. Ovakva oštećenja su primećena i na prstenovima prevučenim TiAlN.

Optimizirana ležišta, pri kraju faze njihove evolucije, pokazivala su eksperimentalno ponašanje koje je očekivano, to jest, radila su bez oštećenja [61, 62, 64]. Hibridna ležišta su uticala na značajno poboljšanje ponašanja brzohodih vretna. Uspeh ovog projekta je doveo do proširenja istraživanja i na druge tipove ležišta, kao što su kotrlajuća ležišta sa konvencionalnim ili prevučenim kotrlajnim elementima i prevučenim čeličnim prstenvima [65]. Najnoviji rezultati ovih ispitivanja takođe ukazuju na primetno poboljšanje rada ležišta.

5.2. Moderni alati sa prevlakama za rezanje visokim brzinama i sa visokim performansama

Zahtev za povećanje produktivnosti i efikasnosti modernih alatnih mašina, ubrzava konstruisanje i evoluciju poboljšanih reznih alata. Glavni problem na koji se treba koncentrisati u razvoju alata je rezni materijal i tehnološke karakteristike njegove prevlake. Uobičajeni materijal za alate su brzorezni čelici (HSS), posebno za alate kompleksne geometrije i za složene karbide (tvrdi metali - HM) koji se široko primenjuju za rezne pločice. U oba slučaja, površinsko poboljšanje reznih ivica se vrši pomoću tvrdih prevlaka. Industrija alatnih mašina posvećuje pažnju mehaničkim osobinama materijala koji se koriste kao osnovni materijali, to jest, njihovoj tvrdoći, krutosti, mikrostrukturi, homogenosti, i drugim. S druge strane, da bi se do bile trajne prevlake, razvijene su moderne PVD tehnike, koje daju meke, tvrde ili super tvrde jedno ili višeslojne filmove [66, 67, 68]. Sproveden je eksperimentalni rad značajnog obima, da bi se ispitale performanse rezanja različitih jedinjenja kao reznih alata. Ovakvi eksperimenti su vršeni sa procesima rezanja sa trajnim ili prekidnim uklanjanjem materijala i oni pokazuju tipične vidove oštećenja prevučenih alata [69].

Do sada publikovani rezultati sistematicnih eksperimentalnih zadataka su prikazani na slici 17 [70, 71, 72]. Gornji dijagram na ovoj slici prikazuje eksperimentalne rezultate koji pokazuju korelaciju između brzina rezanja, postignutog broja rezanja i uočenih oštećenja alata pri glodenju, za dva različita sistema sa prevlakama [70]. Šta više, uticaj sistema sa prevlakama i debljine prevlaka na radni vek alata u operacijama struganja su ispitivani, i oni su prikazani na srednjem dijagramu na istoj slici [71, 72]. Uticaj debljine prevlake na zamor alata od brzorezih čelika je još bio ispitivan eksperimentalno i analitički u prethodnim istraživanjima [73]. Ova istraživanja su pru-

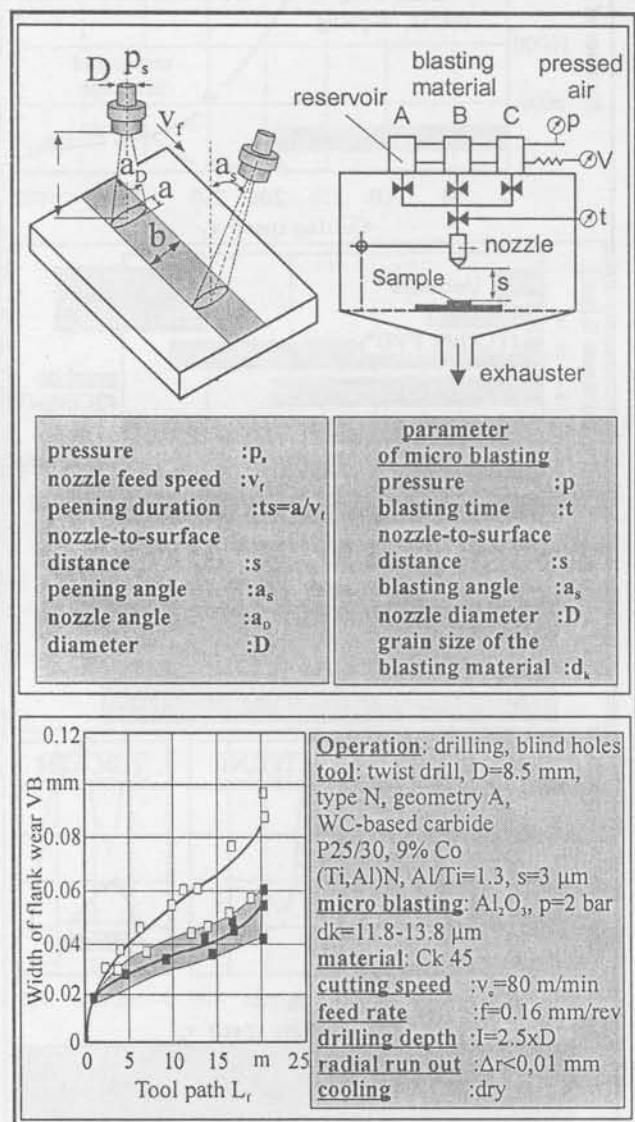


Slika 17. Performanse alatnih mašina kao funkcije parametara rezanja i specifikacija prevlaka prema Koenig-u i Klocke-u [70, 71, 72]

žila dobro zasnovan kvalitativni odgovor na pitanje o ponašanju alata sa prevlakama pri rezanju.

Dodatna ispitivanja su ilustrovala uticaje ostalih faktora, kao što su prethodna obrada osnovnog materijala na radni vek alata sa prevlakama [74, 75]. Gornji deo slike 18 pokazuje princip bombardovanje kuglicama u vodenoj struji ili mikro bombardovanjem, tehnikama koje su već ugrađene u komercijalne uređaje. Kao tipičan rezultat primene ovih metoda, dijagram na istoj slici prikazuje testove bušenja temperovanog čelika koji analizira uticaj mehaničke obrade površine na otpornost na habanje karbidnih alata sa PVD prevlakama.

U najnovijim istraživanjima je pokazano da je, pri dinamičkim stanjima napona, koji nastaju u procesima rezanja sa prekidnim skidanjem materijala, vrlo značajan i uticajni faktor oštećenja rezne ivice i prevlake, oblik i veličina promenljivog polja napona [76]. Kritične kom-



Slika 18. Principi bombardovanja kuglicama u vodenoj struji, eksperimentalni uredaj za mikro bombardovanje i njegov uticaj na bušenje prema Toenshoff-u [20, 21, 22, 74, 75]

ponente napona na zamor mogu postati dominantni parametri habanja za kombinaciju prevlaka - osnovni materijal. Ovaj odeljak pokaže kako model predviđanja zamora prevlake može biti iskorišćen pri procesu rezanja sa prekidnim skidanjem materijala, uz pomoć tri različite prevlake. To su jednoslojna CrN prevlaka, zatim prevlaka TINALOX® i strukturalna prevlaka SUPERTIN®.

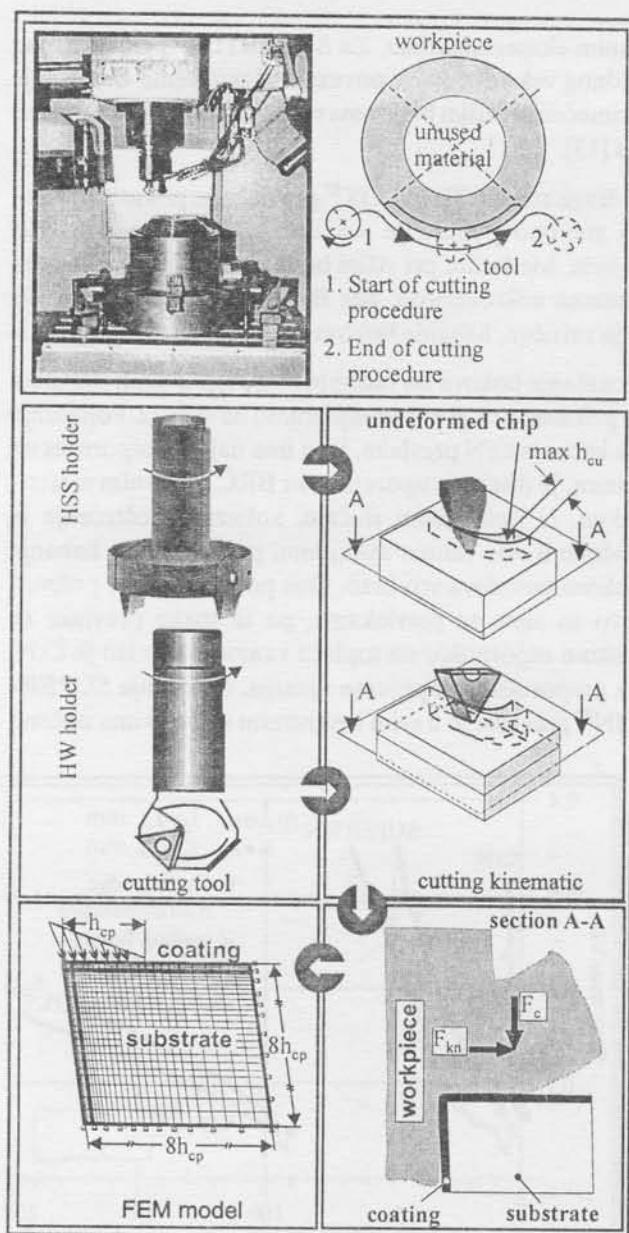
Gore pomenute prevlake su ispitivane pri glodanju, na pločicama od tvrdih metala (TM) i brzorezih čelika (BRČ) [77]. U toku ispitivanja, prevučene pločice od BRČ i kompleksnog karbida su testirane u uslovima rezanja sa prekidnim skidanjem materijala, na obradnom centru sa četiri osovine i cilindričnim radnim predmetom. Na gornjem delu slike 19 je pokazan sistem radni komad-alat. Neophodni, prethodno procenjeni broj uzaštopnih prolaza, je postignut sledećom postupnom cikličnom putanjom propisanom odgovarajućim NC kodom. Da bi se ostavilo da materijal radnog komada ima približno ravnomernu kristalnu strukturu i mehaničke osobine, uklonjen je samo spoljašnji cilindrični sloj ispitivanog komada.

Optičko razmatranje proizvedenih površina, nivo buke mašine, kao i boja proizvedene strugotine, su takođe bili pokazatelji stanja pločice posle svakog pojedinačnog eksperimenta. Pri eksperimentima glodanja sa pločicama od kompleksnog karbida, rezanje je bilo suvo, dok je pri eksperimentima sa BRČ pločicama za hlađenje i uklanjanje strugotine izabran mlaz emulzije. SE mikroskopija i EDX spektroskopija su korišćene za detaljniji analizu, kako će kasnije biti opisano.

Usled izabrane geometrije alata, rezna ivica je ravnomerno opterećena po dužini koja odgovara aksijalnoj dubini rezanja i uglu pozicioniranja pločice. Za rezni alat, ova naponska situacija odgovara tipičnoj analizi ravanskog stanja deformacije. Na ovaj način, trodimenzionalni problem rezanja može se opravdano redukovati na dvo-dimenzionalan, omogućavajući zato korišćenje resursa CPU za ustanovljavanje finije mreže čvorova i smanjenje greške diskretizacije, koju uvodi trodimenzionalna simulacija.

Strategija modeliranja je takođe pokazana na slici 19 i za pločice od BRČ i od kompleksnog karbida. Sistem alat-rodni komad je simuliran modelom ravanskog stanja deformacije prevučene rezne ivice. Rezna opterećenja koja deluju su primenjena u formi raspodele pritiska normalno i tangencijalno na površinu, koje se dobijaju korišćenjem potpune kinematike rezanja, prethodno određenih sila rezanja i faktora sabijanja strugotine, koji su izabrani reznim procesom.

Gore pomenuta MKE simulacija procesa glodanja zah-teva podatke o materijalu i tehnologiji kao i o kontaktnoj geometriji. Uzimajući u obzir da ove veličine zavise od geometrijske konfiguracije alata, kinematike rezanja



Skica 19. MKE simulacija proces glodanja za određivanje napona alata

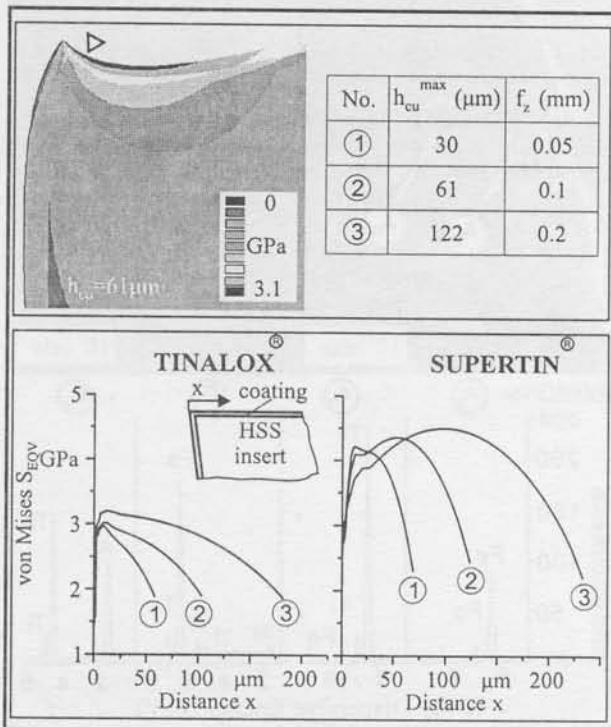
i komponenata materijala radnog komada, da bi se nastavilo sa pouzdanom simulacijom, ovi su podaci određeni eksperimentalno. Sile rezanja se izražavaju prema Kienzle-Victor-ovim jednačinama, kao funkcije dimenzija nedeformisane strugotine [82]. Štaviše, stišljivost strugotine, izražena faktorom sabijanja strugotine, je eksperimentalno odredena za korišćeni materijal radnog komada pomoću eksperimenta struganja [78, 79, 80].

U sadašnjim ispitivanjima, dominantni istraživački cilj je da se opiše uticaj zamora prevlake na početak i progres oštećenja alata. Zbog toga se moraju ispravno izabrati uslovi rezanja, posebno brzina rezanja, u cilju minimiziranja značaja ostalih opasnih uticaja, kao što su tribomehanički i termički efekti. Ovi mehanizmi, takođe doprinose opštim performansama habanja alata i već su kvantitativno određeni.

MKE model je prilagođen i rešen za ispitivane slučajeve glodanja. Slika 20 prikazuje tipičnu Mizes-ovu raspodelu napona, porast Mizes-ovih ekvivalentnih napona kroz pločice od BRČ sa TINALOX® prevlakom u toku jednog obrta alata, za vreme jedne penetracije alata u materijal radnog komada. Može se uočiti da se povećava debljina strugotine, da naponsko polje postaje intenzivnije i da se povećavaju maksimalni naponi.

Razlog za ovakvo ponašanje je to da, dok se povećava debljina strugotine, kontaktna površina između radnog komada i čeone površine se takođe povećava, ali sile rezanja rastu sa većim nagibom. Na račun toga, očekuju se maksimalni naponi u trenutku kada alat napušta radni komad, posle svake penetracije. Površina koja je najpodložnija napadu zamornog habanja, kod ispitivanih slučajeva rezanja, je čeona površina, pošto se tu pojavljuju maksimalni kontaktni naponi. S druge strane, bok nije kritična oblast, pošto su Mizesovi kontaktni naponi koji tu nastaju mali.

Površinske raspodele napona na TINALOX® i SUPERTIN® prevlakama, duž čeone površine su prikazane na slići 20. Ovi dijagrami mogu da omoguće određivanje kritičnog napona prevlake, kao i oblasti gde se očekuje da počne lom prevlake. Mizes-ov napon S_{EQV}^{\max} za obe prevlake raste sa povećanjem debljine nedeformisane strugotine h_{cu}^{\max} , ali ne istom brzinom. Različito ponašanje ispitivanih prevlaka, kad je u pitanju veličina napona i njegov porast duž rezne ivice, je očigledno.

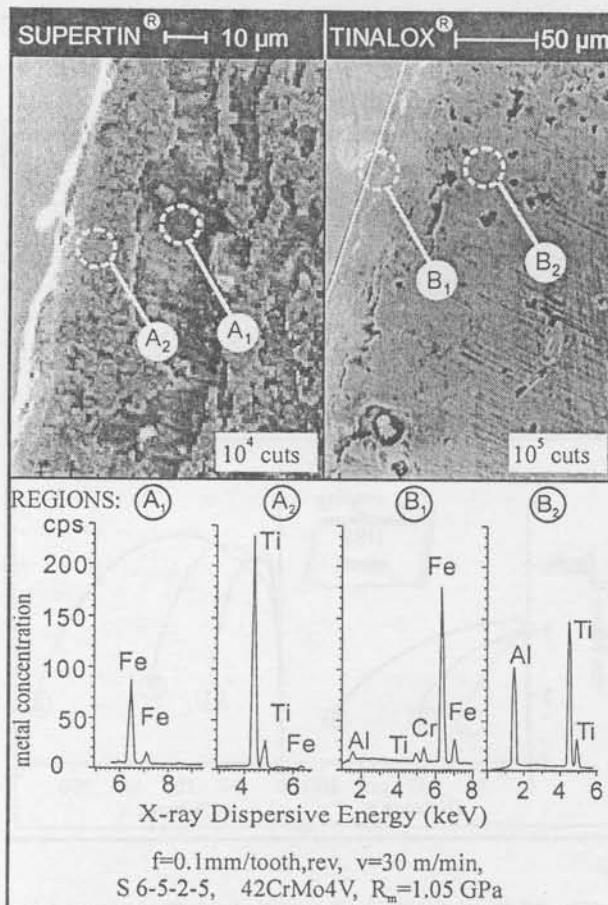


Slika 20. Konture Mizesovih napona i površinske raspodele napona na čeonoj površini pločica od BRČ sa prevlakama za različite uslove rezanja

Ponašanje CrN prevlake je analogno odgovarajućem TINALOX®. Uzimajući u obzir forme porasta njihovih napona, očekuje se da oštećenje TINALOX® bude vrlo blizu vrha rezne ivice, na mestu koje je skoro nezavisno od izabrane brzine rezanja. S druge strane, SUPERTIN® prevlaka se očekuje da otkaže na određenom rastojanju od vrha, takođe na čeonoj površini, koje varira zavisno od izabrane brzine rezanja.

Lokacije ovih oštećenja filma su prikazane na SEM fotografijama na slici 21, i u potpunosti se slažu sa rezultatima napona koji su već prikazani na slici 20. U slučaju SUPERTIN® prevlake, gde maksimalni napon leži na rastojanju od vrha rezne ivice od približno $50\text{ }\mu\text{m}$, dekohezija filma počinje na istom mestu, što su takođe pokazale EDX analize. U ovim oblastima oštećenja prevlake, osnovni materijal je vidljiv u mikrospektralnoj analizi, pokazanoj na donjem delu ove slike. S druge strane, za TINALOX® prevlaku početak oštećenja prevlake se javljuje na vrhu rezne ivice, na čeonoj površini, gde i nastaje najveći napon. Eksperimenti sa CrN prevlakama ilustruju njihovo vrlo loše ponašanje na habanje, što čini ovu prevlaku vrlo nepogodnom za sečenje, mada je vrlo atraktivna za primene kod ležišta.

Dalja ispitivanja glodanjem su vršena sa višim brzinama rezanja nego što su bile primenjene u prethodnim pri-

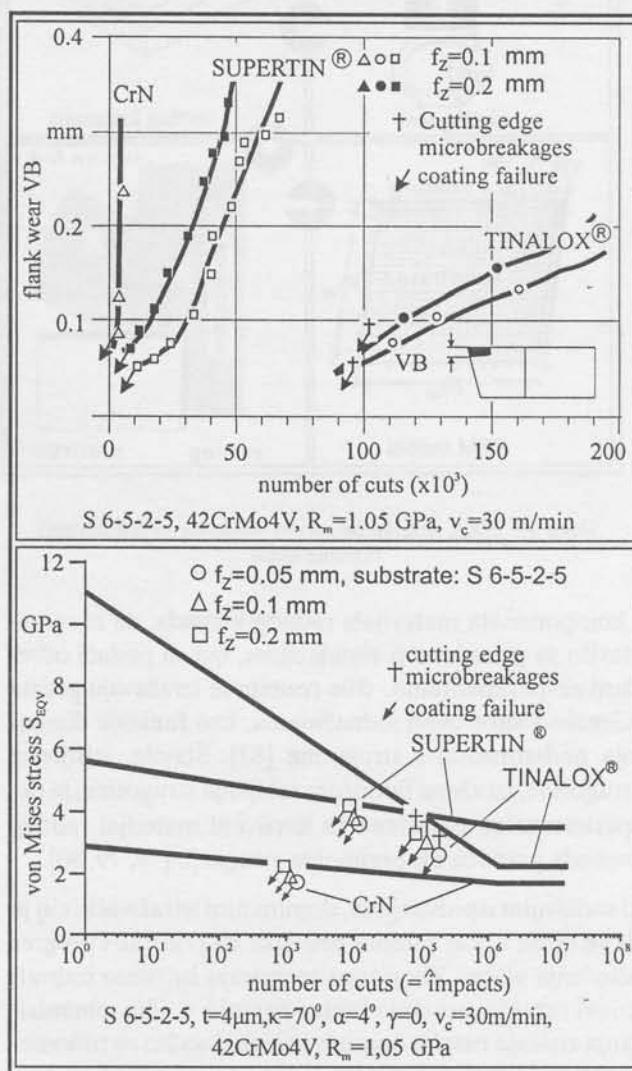


Slika 21. SEM fotografije i EDX mikrospektralne analize za ispitivane prevlake

zanim eksperimentima. Za SUPERTIN® prevlake, pad radnog veka prevlake, povezan sa pojavama zamora, je primećen pri višim brzinama rezanja, kao što je otkriveno i u [13].

S druge strane, TINALOX® prevlaka je pokazivala skoro stabilno ponašanje sve do brzine rezanja od 100 m/min . Međutim, pri višim brzinama rezanja, u ivičnim zonama mikrolomova, gde BRČ osnovni materijal više nije zaštićen, habanje bokova se uvećavalo vrlo brzo..

Ponašanje bokova na habanje (VB) ispitivanih prevlaka je prikazano na gornjem dijagramu na slici 22. Ponašanje na habanje CrN prevlake, koja ima najnižu otpornost na zamor, je direktno uporedivo sa BRČ osnovnim materijalom. U ispitivanom slučaju, koheziono oštećenje je uočeno u vrlo ranom stadijumu, posle čega se habanje bokova povećava vrlo brzo. Ovo ponašanje nije prihvativljivo za alate sa prevlakama, pa se meke prevlake sa niskom otpornošću na toplotu i zamor, kao što je CrN, ne preporučuju za procese rezanja. Oštećenje SUPERTIN® prevlake je u svim ispitivanim slučajevima uočeno



Slika 22. Habanje bokova u funkciji broja uzastopnih prolaza, i objašnjenje zamora ispitivanih prevlaka

na oko 10^4 uzastopnih prolaza. Međutim, lom prevlake je bio postepen, i "otkrivanje" osnovnog materijala je trajalo u toku još mnogo uzastopnih prolaza posle počinjanja oštećenja.

Alat je uspeo da izdrži primjenjena rezna opterećenja za više od $5 \cdot 10^4$ prolaza uz habanje boka manje od 0.4 mm . U slučaju TINALOX® prevlake, koheziono oštećenje je počelo da biva vidljivo posle približno 10^5 uzastopnih prolaza. Ovo oštećenje je bilo posledica mikrolomova rezne ivice, usled pojave zamora BRČ osnovnog materijala. Povećana tvrdoća i otpornost na habanje ove prevlake, čak i posle početka njenog oštećenja, su omogućavale izuzetnu otpornost na habanje cele rezne ivice. Eksperimenti rezanjem sa uzorcima sa TINALOX® prevlakama su bili prekidani, u velikom broju slučajeva, kada je habanje boka dostiglo približno vrednost od 0.1 mm .

Korelacija između eksperimentalnih i analitičkih rezultata, koji se odnose na zamor prevlake, može se takođe uočiti i na donjem dijagramu na slici 22, gde se razmatraju Woehler-ovi dijagrami za ispitivane prevlake. Uzimajući u obzir nastale napone i osobine zamora CrN prevlake, očigledno je da je očekivano vrlo rano oštećenje prevake, što se i desilo. Zasnovan na činjenici da su Mizes-ovi naponi koncentrisani blizu vrha rezne ivice, prevremen i lom prevlake dovodi do brzog izlaganja BRČ osnovnog materijala, i do pratećeg porasta habanja, u skladu sa korišćenim uslovima rezanja, i tvrdoćom osnovnog materijala. U slučaju SUPERTIN® prevlake na BRČ osnovnom materijalu, očekivana je povećana opasnost od zamora da se pojavi posle oko 10^4 uzastopnih prolaza, zavisno takođe i od korišćene brzine rezanja, što je i potvrđeno eksperimentalnim rezultatima. U svim ispitivanim slučajevima, uočeno je kohezioni vid oštećenja na čeonoj površini. Ova oštećenja su se uklapala u proračunom predviđeno ponašanje, kad su u pitanju vrednosti napona i mesta njihovih maksimalnih vrednosti.

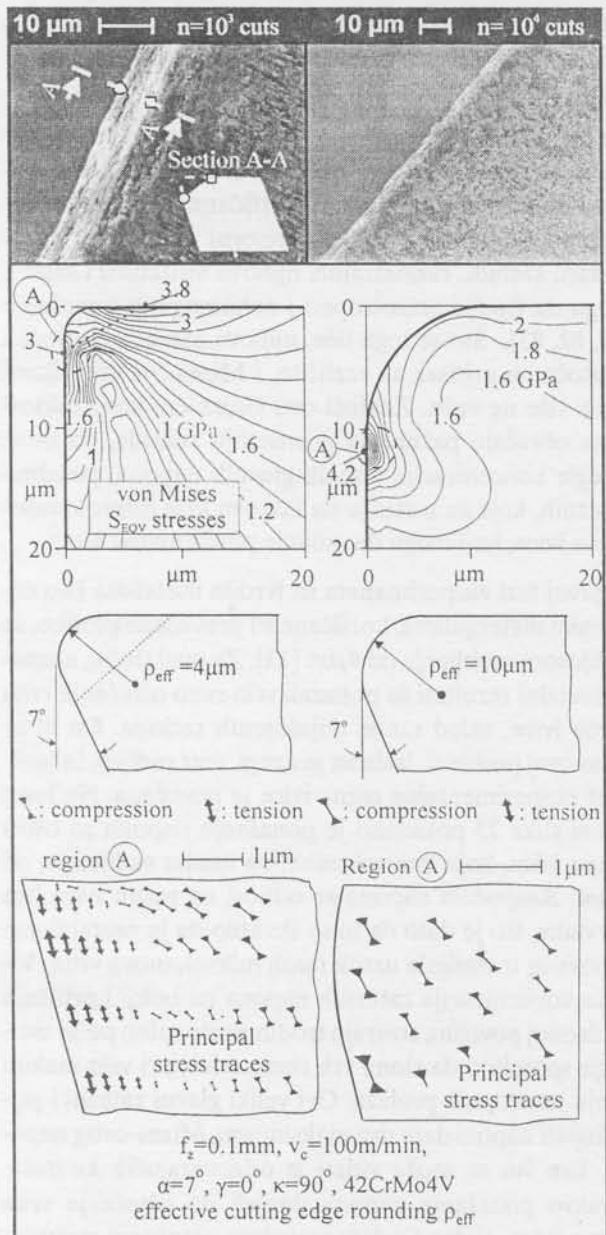
Štaviše, zamorno ponašanje TINALOX® prevlake nante na BRČ osnovni materijal, je dalje dokazalo adekvatnost Woehler-ovih dijagrama za tačno predviđanje oštećenja filma. U svakom od ispitivanih slučajeva, početak oštećenja i položaj ljuštenja su bili u potpunosti predviđeni i uočeni. Ovaj tip super tvrdih prevlaka je pokazao izuzetno ponašanje pri habanju. Čak i posle početka oštećenja, preostali deo ove, na habanje otporne prevlake, je uspevao da zaštiti osnovni materijal, imajući manji nagib krive habanja za reznu ivicu. Vršeni su i dalji eksperimenti glodanjem, sa pločicama od BRČ osnovnog materijala, sa prevlakama, pri većim brzinama rezanja. Za SUPERTIN® prevlaku uočen je pad radnog veka pri višim brzinama rezanja, povezan sa pojavama habanja osnovnog materijala, što je otkriveno i u ranijim ispitivanjima [73]. S druge strane TINALOX® prevlaka je pokazivala skoro stabilno ponašanje za brzine rezanja do 100 m/min . Posle loma prevlake pri višim brzinama

rezanja, kada BRČ osnovni materijal više nije zaštićen, habanje se naglo povećava, kao što se i očekuje, poznavajući termičku stabilnost pločica od BRČ.

Da bi se dalje analizirale performanse na habanje različitih osnovnih materijala, vršeni su dodatni eksperimenti glodanjem, pri čemu su korišćene pločice od kompleksnog karbida (HM) kao osnovni materijal. Kompleksni karbidi, razmatrajući njihovu strukturu i sastav, mogu da ispolje anizotropno i nehomogeno ponašanje [81, 82, 83]. Što se toga tiče, njihova zatezna čvrstoća i čvrstoća na pritisak su različite, i Mizes-ovi kriterijumi loma više ne važe. Znajući ovu činjenicu, konstruktori alata obraćaju pažnju na geometriju rezanja, da bi se izbegle koncentracije visokih glavnih naponi, posebno zateznih, koje su u stanju da izazovu krte mikrolomove rezne ivice, koji mogu da umanju performanse alata.

U prvoj fazi eksperimanata sa tvrdim metalima kao osnovnim materijalima, korišćene su prevučene pločice, sa radijusom zaobljenja od $4 \mu\text{m}$ [13]. Za ovaj slučaj, eksperimentalni rezultati su pokazali vrlo rano oštećenje vrha rezne ivice, usled ranije objašnjениh razloga. Da bi se rešio ovaj problem, izabran je drugi, veći radius, i stabilnost eksperimentalne rezne ivice je povećana. Na levoj strani slike 23 pokazano je ponašanje napona za oštru reznu ivicu, koja ima vrh zaobljen malim radijusom od $4 \mu\text{m}$. Raspodela napona se odnosi na reznu ivicu bez prevlake, što je dato da bi se shvatilo da je nestabilnost osnovnog materijala uzrok ranih mikrolomova vrha. Visoka koncentracija zateznih naponi na boku i pritisnih na čeonoj površini, stvaraju trodimenzionalno polje savijanja sposobno da slomi vrh rezne ivice, pri vrlo malom broju uzastopnih prolaza. Ovi veliki glavni zatezni i pritiskujući naponi daju dva maksimuma Mizes-ovog napona, kao što se može videti iz odgovarajućih kontura. Ovakvo ponašanje napona dovodi do oštećenja vrha rezne ivice, sličnog odgovarajućem oštećenju prikazanom na SEM mikrografu na istoj slici.

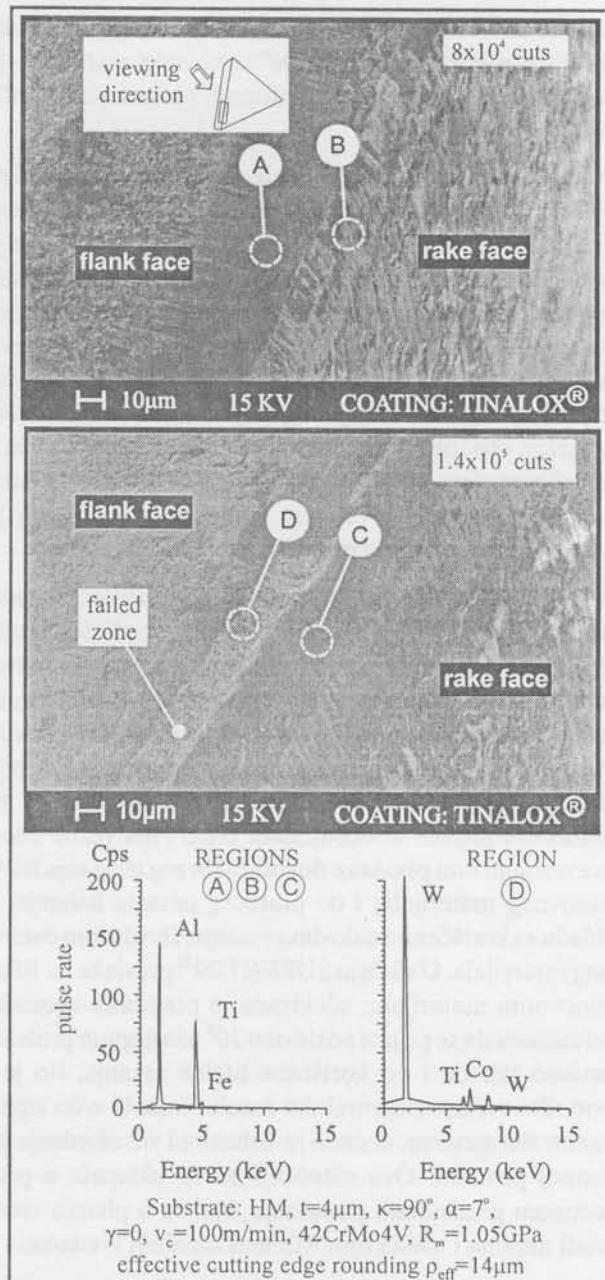
Kada je primjeno veće zaobljenje rezne ivice, raspodela napona je drugačija i ima samo lokalni maksimum u blizini početka zaobljenja na boku (vidi desni deo slike 23). Ova koncentracija napona se uglavnom sastoji od pritisnog glavnog napona, što nije tako kritično za tvrde metale. Gore pomenuti rezultati napona adekvatno verifikuju poznatu tehniku formiranja zaobljenih vrhova reznih ivica, zasnovanu na iskustvu. Ovaj problem nije naročito kritičan kod BRČ osnovnih materijala, uzimajući u obzir njihovu izotropiju i homogenost, koje omogućavaju primenu Mizes-ovih kriterijuma loma, ali mogu da nastanu i u slučaju velikog zazora i čeonih uglova. Kako se može videti sa SEM mikrografa sa iste slike, za pločicu čija geometrija odgovara onoj prikazanoj na slici 23, ali sa adekvatnim zaobljenje od $10 \mu\text{m}$, rezna ivica može da podnese značajan broj uzastopnih prolaza, bez



Slika 23. Uticaj radijusa zaobljenja pločice na performanse alata od kompleksnog karbida

ikavog oštećenja. Uslovi rezanja su u ovom slučaju bili identični onima za pločicu sa oštrom reznom ivicom.

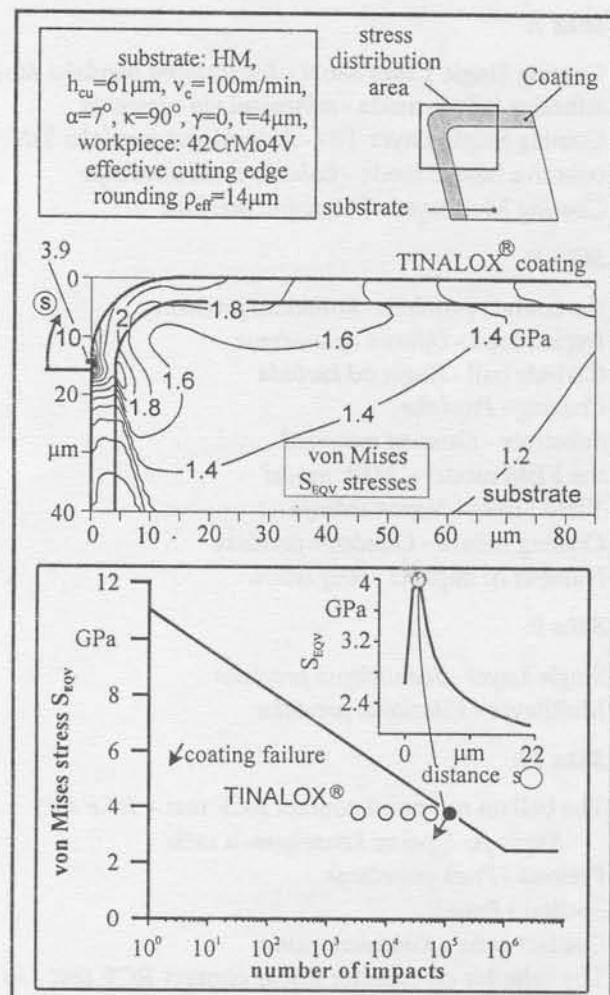
Slika 24 pokazuje eksperimentalne rezultate, dobijene za rezne pločice sa prevlakama sa poboljšanom geometrijom. Efektivni radius zaobljenja vrha rezne ivice se sastoji od radijusa zaobljenja pločice od kompleksnog karbida plus debljina prevlake, pošto prevlaka prati krivinu osnovnog materijala pri procesu nanošenja. Gornja SEM fotografija iprikazuje upotrebljavu reznu ivicu posle znatnog broja prolaza. Fotografija je snimljena sa neprovidne tačke posmatranja, koja predstavlja bok, zaobljenje rezne ivice i čeonu površinu. I optičko posmatranje kao i prikazana EDX mikrospektralna analiza, pokazuju da je rezna ivica neoštećena, pošto su skenirani samo hemijski elementi koji pripadaju TINALOX® prevlaci.



Slika 24. Uticaj radijusa zaobljenja vrha rezne ivice na performanse alata od kompleksnog karbida pri glodanju

Sa druge strane, druga SEM fotografija odgovara identičnom slučaju geometrije rezanja i podacima obrade, ali posle broja prolaza koji odgovara početku oštećenja prevlake. Oštećeni deo (detalj D) u manje tamnoj zoni na početku zaobljenja je u blizini boka. Na ovoj slici oštećenje prevlake je takođe zamorno kohezionog tipa. Zadivljujuće je da rezna ivica, osim ovih lokalnih oštećenja prevlake, zadržava sopstvenu geometriju rezanja, dok se lomovi ne pojavljuju.

Rezultati za napon prikazani na slići 25 kvantitativno objašnjavaju prethodno prikazana oštećenja prevlaka. Zona oštećene prevlake se karakteriše lokalnom koncentracijom Mises-ovog napona. Maksimalna vrednost Mises-ovog napona sa raspodele napona po čeonoj povr-



Slika 25. Raspodela Mizesovog napona na TINALOX® prevlaci na reznoj ivici od kompleksnog karbida.
Predviđanje zamornog oštećenja prevlake

šini, takođe prikazana na ovoj slici, može se dovesti u korelaciju sa odgovarajućim Woehler-ovim dijagramom za TINALOX® prevlaku. Eksperimentalno uočeno oštećenje prevlake se dobro slaže sa predviđenim oštećenjem za ovaj nivo napona prema Woehler-ovom dijagramu.

U prethodnom izlaganju, analizirano je ponašanje na habanje različitih prevlaka na osnovnom materijalu brzorezom čeliku i kompleksnom karbidu, eksperimentalno pri glodanju i analitički uz pomoć MKE simulacije rezne ivice. Eksperimentalni rezultati se dobro slažu sa predviđenim analitičkim rezultatima, i pokazuju superiorno ponašanje nove generacije super tvrdih i relativno manje krutih prevlaka dobijenih PVD postupcima. Štaviše, eksperimentalna i analitička ispitivanja ovih prevlaka na kompleksnom karbidu, dovele su do novog dizajna vrha rezne ivice, koji štiti osnovni materijal od krtih oštećenja, koja su prouzrokovana lokalnim nastankom visokih napona. Prezentirani rezultati objašnjavaju mnoštvo različitih observacija o procesima rezanja sa prekidnim uklanjanjem materijala, koje su kvalitativno korišćene pri konstruisanju alata. Postupci opisani u

prethodnim odeljcima ilustruju kvantitativni metod za biranje osnovnog materijala, prevlaka i geometrije rezne ivice, u cilju postizanja zahtevanih visokih performansi alata, uz minimalne razvojne troškove.

6. ZAKLJUČCI

Razvoj modernih PVD prevlaka, zajedno sa dobro organizovanim postupcima kontrole kvaliteta, su u mogućnosti da proizvedu sisteme sa prevlakama, sa ponекад zadržavajućim osobinama. Nesumnjivo odbrambeno delovanje prevlaka protiv faktora koji mogu da unište konvencionalne materijale bez prevlaka, je odgovorno za širenje ovih metoda na nove aplikacije, koje su tradicionalno bile tretirane strategijama koje nisu dozvoljavale korišćenje slojevitih materijala. Inženjeri ipak moraju da obrate pažnju prilikom izbora sistema sa prevlakama, kod nekih primena, razmatrajući sve moguće parametre, koji bi učinili prevlaku neaktivnom.

PREVODI OZNAKA NA SLIKAMA:

Slika 1:

Thin Film Technologies - Tehnologije tankih filmova
PVD processes - PVD procesi
Hybrid processes - Hibridni procesi
PVD and Plasma Assisted processes - PVD i Plazmom pomognuti procesi (PA)
Sputtering Processes - Procesi prskanja
Arc-Evaporation - Isparavanje lukom
PA Processes - PA procesi
Magnetron Sputtering - Prskanje u uređaju za magnetnu rezonancu (Magnetron)
Random Arc - Slučajni luk
Plasma Nitriding - Plazma nitriranje
Umbalanced Magnetron - Neuravnoteženi uređaj za magnetnu rezonancu
Pulsed Arc - Pulsirajući luk
Ion Implantation - Jonska implantacija
UMB Closed Loop - UBM zatvorena petlja
Hybrid Processes - Hibridni procesi
Sputter Ion Plating - Jonsko prevlačenje prskanjem
Arc and MSIP - Lučno i MSIP
H.I.S. Processes - H.I.S. procesi
U.S.E. Diamond Deposition - U.S.E. dijamantsko prevlačenje

Slika 3:

Film Texture - Sastav filma
Coating Type - Tip prevlake
Typical Films - Tipični filmovi
Monolayer Coatings - Jednoslojne prevlake
Multilayer Compositional Coating - Višeslojne kompozitne prevlake
Multilayer Structural Coating - Višeslojne strukturne prevlake

Nanostructure Bi-layer Coatings (MNBL) - Nano-strukturne Dvoslojne prevlake (MNBL)
Nanolayer Structural Coatings - Nano-slojne strukturmne prevlake
Superlattice Structural Coatings - Strukturalne prevlake sa super-rešetkom
few atomic cells - nekoliko atomskih rastojanja

Slika 4:

The spherical calotte test - Test sferne kalote
Results - Rezultati
Coatings Thickness - Debljina prevlaka
Film Adhesion - Adhezija filma
Wear behaviour - Ponašanje na habanje
Coatings - Prevlaka
Substrate - Osnovni materijal
Nanohardness measurements - Merenja nano-tvrdoće
Bulk film hardness - Tvrdoća materijala filma
Coating Young Modulus - Modul elastičnosti prevlaka
Thickness - Debljina
Yeld Strength - Granica tečenja
Indentation depth - Dubina utiskivanja
Relaxation - Relaksacija
Loading - Opterećenje
Indentation Load - Opterećenje utiskivanja
Rockwell Indentation Tests - Rokvelov test utiskivanja
Acceptable adhesion - Prihvatljiva adhezija
Inadmissible adhesion - Neprihvatljiva adhezija
Qualitative Adhesion Measurements - Kvalitativna merenja adhezije
The Sretch Test - Test grebanjem
Noice - Buka
Coating TiN on HSS - Prevlaka TiN na brzoreznom čeliku

Slika 5:

Principle of the Ball on Disk Tribological Test - Test po principu Kugla po Disku
motor - motor
ball - kugla
coated disk - disk sa prevlakom
holder - držač
Friction coefficient - Koeficijent trenja
Wear width - Širina habanja
Principle of the Four Ball Tribological Test - Tribološki test po principu četiri kugle
Speciments - Uzorci
Load - Opterećenje
Base Oil - Bazno ulje
Wear slope - Nagib habanja
Litium Grease - Litijumska mast

Slika 6:

coating failure - oštećenje prevlaka
no coating failure - bez oštećenja prevlaka
impact load - udarno opterećenje
impact number - broj udara

Slika 7:

Coating Single Layer MoN - Jednoslojna prevlaka MoN adhesive failure mode - adhezioni vid oštećenja
Coating Single Layer TiN - Jednoslojna prevlaka TiN cohesive failure mode - kohezioni vid oštećenja
Coating Multilayer - Višeslojna prevlaka

Slika 8:

the contact problem - kontaktni problem
Impact load - Udarno opterećenje
Carbide ball - Kugla od karbida
Coating - Prevlaka
Substrate - Osnovni materijal
the FEM model - MKE model
Yield Stress - Napon tečenja
Coating failure - Oštećenje prevlaka
Number of impacts - Broj udara

Slika 9:

Single Layer - Jednoslojna prevlaka
Multilayer - Višeslojna prevlaka

Slika 10:

The ball on rod point contact RCF test - RCF test
Kugla-po-Šipci sa kontaktom u tački
Preload - Predopterećenje
Section - Presek
Contact zone - Kontaktna zona
The cylinder on cylinder linear contact RCF test - RCF test Cilindar-po-Cilindru sa kontaktom po liniji

Slika 11:

Simulation of the ball on rod RCF test - Simulacija RCF testa Kugla-po-Šipci
Coating - Prevlaka
Section - Presek
Coating TiAlN, position A loaded, steady state - Prevlaka TiAlN, položaj A opterećen, stacionarno stanje
Coating TiAlN, position A relaxed, steady state - Prevlaka TiAlN, položaj A rasterećen, stacionarno stanje
Equivalent Stress - Ekvivalentan napon
Rolling track - Kotrljavna staza
coated rod - prevučena šipka

Slika 12:

Cycles - Ciklusi
Percentage of failed specimens - Procenat oštećenih uzoraka

Slika 13:

Conventional bearings - Konvencionalna ležišta
Hybrid bearings - Hibridna ležišta
Ceramics balls - Keramička ležišta
Effect of spindle rotational speed on productivity - Uticaj obrtne brzine vretena na produktivnost
Manufacturing time - Vreme proizvodnje

Spindle rotational speed - *Obrtna površina vretena*
Conventional speed - *Konvencionalne brzine*
Rotating capacity up to 4000 rpm - *Rotacioni kapacitet do 40000 obrtaja*

High speed spindle of a grinding machine tool - *Brzohodo vreteno brusilice*

modelling of each bearing separately - *modeliranje svakog ležišta posebno*

section - *presek*

origine - *koordinatni početak*

contact ellipse - *kontaktna elipsa*

Rolling direction - *Pravac kotrljanja*

The FEM model - *MKE model*

Slika 14:

preload - *predopterećenje*

Slika 15:

rpm - *obrtaja u minuti*

coating fatigue safe area - *bezbedna oblast na zamor za prevlaku*

Preload - *Predopterećenje*

Slika 16:

coating fatigue safe area - *Bezbedna oblast na zamor za prevlaku*

Friction coefficient - *Koefficijent trenja*

rpm - *obrtaja u minuti*

preload - *predopterećenje*

Slika 17:

Number of impacts - *Broj uzoraka*

PVD coated - *Prevučeno sa PVD-TiN*

Work material - *Radni materijal*

substrate - *osnovni materijal*

crater wear - *fretting, prsline, ljuštenje*

cracks and breakage - *prsline i prelom*

CVD-TiC/TiN coated - *Prevučeno sa TiC/TiN*

Cutting speed - *Brzina rezanja*

Coating thickness - *Debljina prevlake*

Uncoated - *Bez prevlake*

process: dry turning - *proces: suvo struganje*

Cutting time - *Vreme rezanja*

Slika 18:

reservoir - *rezervoar*

blasting material - *materijal za bombardovanje*

pressed air - *vazduh pod pritiskom*

nozzle - *mlaznica*

Sample - *Uzorak*

exhauster - *izbacivanje*

pressure - *pritisak*

nozzle feed speed - *brzina punjenja mlaznice*

peening duration - *trajanje bombardovanja*

nozzle-to-surface distance - *rastojanje od mlaznice do površine*

peening angle - *ugao bombardovanja*

nozzle angle - *ugao mlaznice*

diameter - *prečnik*

parameter of micro blasting - *parametri mikro bombardovanja*

pressure - *pritisak*

blasting time - *vreme bombardovanja*

nozzle diameter - *prečnik mlaznice*

grain size of the blasting material - *veličina zrna materijala za bombardovanje*

Width of flank wear - *Širina bočnog habanja*

Tool path - *Putanja alata*

Operation: drilling blind holes - *Operacija: bušenje, upušteni otvor*

tool: twist drill - *alat: zavojna burgija*

geometry - *geometrija*

WC-based carbide - *WC-karbid*

micro blasting - *mikro bombardovanje*

material - *materijal*

cutting speed - *brzina rezanja*

feed rate - *brzina obrtanja*

mm/rev - *mm/obrtaju*

drilling depth - *dubina bušenja*

radial run-out - *radijalno bacanje*

cooling: dry - *hlađenje: suvo*

Slika 19:

workpiece - *radni predmet*

tool - *alat*

Star of cutting procedure - *Početak procesa rezanja*

End of cutting procedure - *Kraj procesa rezanja*

HSS holder - *Držač od brzorezog čelika*

HW holder - *HW držač*

cutting tool - *rezni alat*

undeformed chip - *nedeformisana strugotina*

cutting kinematic - *kinematika rezanja*

section - *presek*

coating - *prevlaka*

substrate - *osnovni materijal*

FEM model - *MKE model*

Slika 20:

fon Misses $SEQV$ - *Mizesov napon $SEQV^{max}$*

Distance - *Rastojanje*

coating - *prevlaka*

HSS insert - *BRČ pločica*

Slika 21.

Regions - *Oblasti*

metal concentration - *koncentracija metala*

X-ray Dispersive Energy - *Disperziona energija X-zraka*

mm/tooth, rev - *mm/obrtaju zuba*

Slika 22:

flank wear - *habanje bokova*

Cutting edge microbreakages - *mikrolomovi rezne ivice*

coating failure - oštećenje prevlake
 number of cuts - broj prolaza
 von Mises SEKV - Mizesov napon $SEKV^{max}$
 substrate - osnovni materijal
 impacts - udari

Slika 23:

Section - Presek
 von Mises SEKV stresses - Mizesov napon $SEKV^{max}$
 compression - pritisak
 tension - zatezanje
 region - oblast
 Principal stress traces - Tragovi glavnih napona
 effective cutting edge rounding - efektivni radijus
 zaobljenja rezne ivice

Slika 24:

viewing direction - pravac posmatranja
 cuts - prolazi
 flank face - bočna površina
 rake face - čeona površina
 Coating - Prevaka
 failed zone - oštećena zona
 Regions - Oblasti
 pulse rate - brzina pulsiranja
 Energy - Energija
 Substrate - Osnovni materijal
 effective cutting edge rounding - efektivni radijus
 zaobljenja rezne ivice

Slika 25:

substrate - osnovni materijal
 workpiece - radni komad
 effective cutting edge rounding - efektivni radijus
 zaobljenja rezne ivice
 stress distribution area - zona raspodele napona
 Coating - Prevaka
 von Mises SEKV stresses - Mizesov napon $SEKV$
 coating failure - oštećenje prevlake
 distance - rastojanje
 number of impacts - broj udara

LITERATURA

- [1.] Strafford, K., et., al., Coatings and surface treatment for corrosion and wear resistance, Ellis Horwood Ltd, (1984).
- [2.] Leyendecker, T., Über neuartige schneid- werkzeugbeschichtungen auf Titan und Aluminium- basis, Entwicklungs-berichte, Aachen, (1993)
- [3.] Esser, S., Ein neuartiges konzept von PVD besschichtungsanslagen für den industriellen einsatz entwicklung und produktion, CemeCon Entwicklungs-berichte, Aachen, (1995)
- [4.] Spur, G., Byrne G., Bienia, B., The performance of PVD coated High Speed Steel indexable inserts in the milling of ductile materials, ICMCI7, San Diego, B 2-6, (1992)
- [5.] Maisel, L., et., al., Handbook of thin film technology, Mc Graw-Hill, (1970)
- [6.] Vidakis, N., Determination of the fatigue strength of thin hard coatings for the prediction of their life time on hybrid bearings steel races, used in high speed spindles of machine tools, PhD Thesis, Aristotle Univ. of Thessaloniki, Greece, (1997)
- [7.] CemeCon GmbH, Informational Bulletins: Coating Services, Aachen (1997)
- [8.] Erkens, G., Leyendecker, T., Wenke, R., Esser, S., A flexible PVD coatings unit for research and production, proc. of 2nd int. conf. Balkantrib'96, Thessaloniki, pp. 441-448, (1996)
- [9.] Frey, G., Dünnenschichttechnologie, VDI Verlag Düsseldorf, (1987)
- [10.] Sproul G., Multi-cathode unbalanced magnetron sputtering systems, Surface and Coatings Technology, 49, Vol.1, S.284ff, (1991)
- [11.] N., N., German Patent Issue DE 392 0772 A1 (1989)
- [12.] Karamis, Baki, M., Sert, H., Physical vapor deposition techniques for industrial applications, proc. of 2nd int. conf. Balkantrib'96, Thessaloniki, pp. 379-384, (1996)
- [13.] Bouzakis, K., D., Vidakis, N., Leyendecker, T., Erkens, G., Esser G., Determination of the fatigue properties of multilayer PVD coatings on various substrates, based on the impact test and its FEM simulation, Thin Solid Films 308-309 pp. 315- 322, (1997)
- [14.] Zheng, L., Ramalingam, S., Multilayer and composite structures for advanced coatings, Surface and Coatings technology, Vol. 81 pp. 52- 71, (1996)
- [15.] Pranevicius, L., et., al., Relaxation of residual stresses in highly stressed multilayers initiated by ion irradiation, Surface and Coatings technology, Vol. 71 pp. 254-258, (1995)
- [16.] Tsou, H., T., Kowbel, W., Design of Multilayer plasma assisted CVD coatings for the oxidation protection of composite materials, Surface and Coatings technology, Vol. 79 pp. ,139-170, (1996)
- [17.] Bull, S., Jones, A., Multilayer coatings for improved performance, Surface and Coatings technology, Vol. 71 pp., 254-258, (1995)
- [18.] Klocke, F., et., al., Beeinflussung der kontaktbedingungen beim zerspanen durch nichtmetallische einschlässe im Stahl, Stahl und Eisen, Vol.10, pp. , 61-66, (1997)
- [19.] Toenshoff, H., K., et., al., Metallurgische Auswirkungen der Calciumbehandlung von Stahlschmelzen auf die Bearbeitbarkeit, Stahl und Eisen, Vol.13, pp., 45-54, (1989)
- [20.] Toenshoff, H., K., et., al., Wear mechanisms of $(Ti_{1-x}Al_x)N$ coatings in dry drilling, Surface and Coatings
- [21.] Toenshoff, H., K., et., al., Characterization and adhesion study of $(Ti,Al)N$ coatings sputtered on cemented carbides, ICMTF97, San Diego, USA (1997)
- [22.] Toenshoff, H., K., Mohlfeld,A., Increasing interface strength of PVD coatings by mechanical substrate treatment, To be published, (1998).

- [23.] Igartua, A., et., al., Application of Low Temperature PVD Coatings in Roller Bearings Tribological Tests and Experiences with Spindle Bearing Systems, Surface and Coatings Technology, Vol., 86-87, pp., 460-466 (1996).
- [24.] Erkens, G., et., al., The contribution of CemeCon to the BRITE project EUROBEARINGS NoBRE2-CT92 -0333, Third Annual Report, Torino, also EC, (1995)
- [25.] Wan H., F., et al., Two dimensional finite element method simulation of Vickers indentation of hardness on TiN-coated steel, Thin Solid Films, Vol., 214, pp., 68-73, (1992)
- [26.] Farges, G., Degout, D., Interpretation of the indentation hardness size effect in Vickers microhardness measurements - Absolute hardness of materials, Thin Solid Films, Vol., 181, pp., 365-374, (1989).
- [27.] Komvopoulos, K., Finite element analysis of a layered elastic solid in normal contact with a rigid surface, Journal of Tribology, Vol., 110, pp., 477- 485, (1988)
- [28.] Loubet, J., L., et., al., Vickers Indentation Curves of Elastoplastic Materials, Micro-indentation Techniques in Material Science and Engineering, ASTM STP 889, Philadelphia, pp., 72-89, (1985)
- [29.] Verein Deutscher Ingenieure, VIII 3198, (1991)
- [30.] Sekler, J., et., al., The scratch test: different critical load determination techniques, Surface and Coatings technology, col., 36, pp., 519-529, (1988)
- [31.] Kral, E., et., al., Hardness of thin film media: Scratch experiments and FEM simulations, ASME journal of tribology, vol., 118, pp., 1-11, (1996)
- [32.] Igartua, A., et., al., Low temperature PVD coatings, control and tribological characterization to be applied in high speed hybrid rolling bearing, proc. of 2nd int. conf. Balkantrib'96, Thessaloniki, pp. 839- 846, (1996)
- [33.] Holmberg, K., et al., Coating tribology, Eslevier Amsterdam, pp. 342, (1994)
- [34.] Ivkovic, B., Jesic, D., Energetic and economic aspect of tribological properties of austempered ductile iron, proc. of 2nd int. conf. Balkantrib'96, Thessaloniki, pp. 367-370, (1996)
- [35.] Ivkovic, B., et., al., Tribological characteristics of materials identification and measurement problem, Journal Wear and Friction, Vol., 14, No., 4 ASB., (1993).
- [36.] Knotek, O., et., al., A new technique for testing the impact load of thin films: the coating impact test, Surface and Coatings Technology, Vol., 54/55, pp.,102-107, (1992)
- [37.] Bouzakis, K., D., Vidakis, N., Leyendecker, T., Erkens, G., Esser G., Determination of the Fatigue Behaviour of Thin Hard Coatings Using the Impact Test and a FEM Simulation, Surface and Coatings Technology, Vol., 86-87, pp., 549- 556 (1996).
- [38.] Rampsey, P., M., Chandler, H., F., Page, T., F., Modeling the contact response of coated systems, Surface and Coatings Technology, Vol., 49, pp., 504, (1991).
- [39.] Komvopoulos, K., Elastic plastic finite element analysis of indented layered media, ASME Journal of Tribology, 1989, Vol., 111, pp., 430, (1989)
- [40.] Montmitonnet, P., et., al., Finite element analysis of elastoplastic indentation: Part II-Application to hard Coatings, ASME Journal of Tribology, Vol., 115, pp.,15-19, (1993)
- [41.] Hertz, H., Collected Works, Vol. I, Barth-Verlag Leipzig, (1895).
- [42.] Swanson Analysis System, INC., ANSYS user manuals: Vol.1 Theo, Vol. 2 Procedures, Vol. 3 Elements Vol. 4 Commands (1995)
- [43.] Niemann, G., Winter, H., Maschinen-elemente, Band II, Springer Verlag, (1982)
- [44.] Bouzakis, K., D., Vidakis, N., An evaluation method of thin PVD films adhesion, using the impact test and a FEM simulation of the contact response, Tribology in Industry, Vol., 3, pp. 69- 75, (1995)
- [45.] Gupta P. K., Walowit, J. A., Contact stresses between an elastic cylinder and a layered elastic solid, Trans. of the ASME, J. Lubr. Technology, Vol., 96, pp., 250-257, (1974)
- [46.] Bouzakis, K., D. Vidakis N., Prediction of the fatigue behaviour of physically vapour deposited coatings in the Ball-on-Rod rolling contact fatigue test, using an elastic plastic finite elements method simulation, Journal WEAR, Vol., 206, pp., 197- 203, (1997).
- [47.] Bouzakis, K., D., Vidakis N., Effect of Mechanical Stresses on the Fatigue Behaviour of Coated Rods in Ball on Rod RCF test, int. Journal of the BTA, Vol. 3, No. 3, pp.,167-178 (1997).
- [48.] Bouzakis, K., D., Vidakis, N., Kallinikidis, D., Igartua, A., Design optimization of a cylinder on cylinder coating rcf tester, to be presented in the 9th DAA-AM, Cluz, (1998)
- [49.] Rampsey, P., M., Chandler, H., F., Page, T., F., Modeling the contact response of coated systems, Surface and Coatings Technology, Vol., 49, pp., 504, (1991)
- [50.] Bouzakis, K., D., Vidakis, N., Superficial plastic response determination of hard isotropic materials using ball indentations and a FEM optimization technique, In press in Int. Journal for Materials Characterization, (1998).
- [51.] Bouzakis, K., D., Vidakis N., Determination of the Plastic Behaviour of Hard Materials Using the Rockwell B Test and a FEM Simulation, Int. Journal of the BTA, vol., 3, No., 3, pp., 192-203, (1997)
- [52.] Besseling, J., F., A theory of elastic, plastic and creep deformation of an initially isotropic material showing anisotropic strain - hardening creep recovery and secondary creep, Journal of applied mechanics pp. 529-536, (1958)
- [53.] Weck, M., Koch, A., Spindle Bearing Systems for High-Speed Applications in Machine Tools, Annals of the CIRP, col., 42/1, pp., 445-448, (1993)
- [54.] Cundil, R., T., High precision Silicon Nitride balls for Bearings, Ball Bearing Journal, Vol., 241, pp., 26-32, (1993)
- [55.] Weck, M., Hanrath, G., Increase of Speed and Lifetime of Spindle Bearing Systems by Combining Hybrid Bearings with Coated Races, Production Engineering, Vol. IV/1, pp., 79-82, (1997)
- [56.] EC Technical Report, "Final report of the BRITE project EUROBEARINGS No BRE2-CT92- 0333", information in WWW internet http://apollo.cor-

- dis.lu/cordiscgi/srchidadb?ACTION=D&SESSID=ON=189151998-2-22&DOC=59, (1997)
- [57.] Bouzakis, K., D., Mitsi, S., Mansour, G., Vidakis, N., Determination of friction torque of angular contact ball bearings, considering different friction coefficient models, Proc. of the 2nd Intern. Conf. Balkantrib'96, pp., 667-678, (1996)
- [58.] Bouzakis, K., D., Mitsi, S., Mansour, G., Vidakis, N., The Determination of Load Distribution and Friction Torque of Angular Contact Ball Bearings, Tribology in Industry, Vol.,18, No., 2, pp., 63-69, (1996)
- [59.] De Mul, et., al., Equilibrium and Associated Load Distribution in Ball and Roller Bearings Loaded in Five Degrees of Freedom While Neglecting Friction, ASME Journal of Tribology, vol., 111, pp.,142-148, (1989).
- [60.] Harris, T., A., Rolling Bearing Analysis, John Wiley Sons Inc., New York, (1991)
- [61.] The contribution of WZL to the BRITE project "EUROBEARINGS", contract No BRE2-CT92- 0333, Third Annual progress report, Torino, also in EU (1996).
- [62.] The contribution of TEKNIKER to the BRITE project "EUROBEARINGS", contract No BRE2- CT92-0333, Third Annual progress report, Torino, also in EU (1996).
- [63.] The contribution of Gamfior to the BRITE project "EUROBEARINGS", contract No BRE2-CT92-0333, Third Annual progress report, Torino, also in EU (1996).
- [64.] Bouzakis, K., D., Vidakis, N., Mitsi, M., Fatigue Prediction of Thin Coatings on the Steel Races of Hybrid Bearings Used in High Speed Machine Tools Spindles, In press in: ASME Journal of Tribology, Vol., No.,121 (1999).
- [65.] Author Collective, The accepted REFINE project proposal, EC, (1997)
- [66.] Bouzakis, K., D., et., al., The wear behaviour of coatings on various substrate materials in milling, proc. of NORDTRIB9B, Denmark, pp., 925-932, (I 998).
- [67.] Bouzakis, K., D., Vidakis, N., Komogiannis, S., The wear behaviour of coated HSS tools in gear hobbing, to be presented in the 9th DAAAM Cluz, (1998)
- [68.] Leyendecker, T., et al., Industrial deposition of binary, ternary and quaternary nitrides of Titanium Zirconium and Aluminium, Journal of vacuum technology, vol., A5 (4), pp., 2173-2179, (1990)
- [69.] Byrne, G., Bienia, B., Tool life scatter when milling with TiN-coated HSS indexable inserts, Annals of the CIRP, vol., 40, pp., 45-48, (1991)
- [70.] Koenig, W., et., al., New Approaches to Characterizing the Performance of Coated Cutting Tools, Annals of the CIRP Vol. 41 (1992).
- [71.] Klocke, F., et., al., Improved cutting processes with adapted coating systems, Annals of the CIRP, vol., 47, pp., 65-68, (1998)
- [72.] Kauven, R., H., Wälzfräsen mit Titannitrid-beschichteten HSS-Werkzeugen, Dissertation, TH Aachen, (1987).
- [73.] Bouzakis, K.-D. Vidakis, N., Effect of the Mechanical Stresses Developed During Gear Hobbing on the Fatigue Failure of Tool Coatings, Int. Jour. Manufacturing Science & Production, Vol.,1-1, pp., 51-58, (1997)
- [74.] Toenshoff, H., K., et., al., Prozessichere Trockenvarbeitung mit TiAlN beschichteten Werkzeugen, VDI-Z special werkzeuge Mai 98, pp., 62-65, (1988)
- [75.] Toenshoff, H., K., et., al., Surface bonding by water peening, Int. conference on Surface Engineering, hsrg, P., Mayr, DGM Informationsgesellschaft, (1993)
- [76.] Bouzakis K., D., et., al., Experimental and FEM analysis of the fatigue behaviour of PVD coatings on HSS substrate in milling, Annals of the CIRP, vol., 47, pp., 69-73, (1998)
- [77.] Bouzakis, K., D., Vidakis, N., Komogiannis, S., The fatigue and wear performance of coated HSS tools in fly hobbing, To be presented in third int. conf. Balkantrib'99, Romania, (1999)
- [78.] Bouzakis, K., D., et., al., Chip formation and chip flaw friction characteristics in turning with PVD coated inserts, To be presented in third int. conf. Balkantrib'99, Romania, (1999).
- [79.] Bouzakis, K., D., Methenitis, G., Determination of the technological parameters, which are used to describe the time course of cutting force components in milling, Annals of the CIRP, vol., 34/1/85, pp.,141-144 (1985)
- [80.] Bouzakis, K., D., Antoniadis, A., Optimal selection of machining data in gear hobbing regarding the tool mechanical stresses occurring during the cutting process, Annals of the CIRP Vol. 37, pp.109-I 12, (1988)
- [81.] Brooks, K., Word directory and handbook of hardmetals, 4th edition, international carbide data, (1987)
- [82.] Bouzakis, K., D., Efstatiou, K., Vidakis, N., The failure mechanism of PVD coated hardmetal inserts in milling, Int. Journal Tribology in Industry, Vol.19, No.3, pp., 93-102., (1997)
- [83.] Bouzakis, K., D., Antoniadis A., Berechnung der mechanischen Werkzeugspannungen beim Hartmetall- Wälzfräsen, VDI-Z, Vol. 135, pp. 83-88.(1993)
- [84.] Zlatanovic, M., Muentz, W., D., Wear resistance of plasma nitrited and ion plated hobs, Surface and coatings technology, Vol., 41, pp., 441-459, (1996)
- [85.] Zlatanovic, M., at., al., Matching of TiN coating structures by plasma nitriding of substrates, Vacuum, Vol., 44, pp., 83-88, (1993)
- [86.] Erkens G., PVD-Prozesstechnik zur Beschichtung von Spindellagern unter 160°C, Doctoral Thesis, RWTH Aachen, (1998)



B. IVKOVIĆ

Simulacija triboloških procesa u zoni rezanja na tribometru "Block On Disk"

Neprekidni razvoj novih materijala, alata i sredstava za hlađenje i podmazivanje nameće potrebu za stalnim izvođenjem eksperimentalnih istraživanja u obradi rezanjem, radi određivanja obradivosti novih materijala i triboloških karakteristika novih reznih alata i sredstava za hlađenje i podmazivanje.

U laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta Univerziteta u Kragujevcu čine se pokušaji već više godina da se tribološki procesi u zoni rezanja simuliraju na Tribometrima Pin on Disk i Block on Disk. U ovom radu dat je prikaz osnovnog prilaza simulacije triboloških procesa u zoni rezanja na Tribometru "Block on Disk".

Ključne reči: Tribologija, tribometar, obradivost

1. UVOD

U tribologiji rezanja proučavaju se procesi trenja i habanja u zonama kontakta alata i materijala predmeta obrade u svim vrstama obrade rezanjem (struganje, gledanje, bušenje, provlačenje i dr.). Brojni izvedeni istraživački programi u kojima su određivani obradivost materijala, eksploracijske karakteristike alata i tribološka (antifrikcionala i antihabajuća) svojstva sredstava za hlađenje i podmazivanje, zasnivali su se na merenjima sile trenja u zonama kontakta reznog klina alata sa materijalom predmeta obrade i merenjima pohabanosti alata u određenim vremenskim periodima rezanja.

U savremenim istraživačkim programima u kojima se razvijaju novi konstrukcijski i alatni materijali, novi postupci povećanja otrpornosti na habanje alata i nove vrste sredstava za hlađenje i podmazivanje deo istraživanja obavezno ima tribološki karakter. Završna ocena eksploracionih svojstava materijala, alata i sredstava za hlađenje i podmazivanje donosi se na osnovu merenja sile trenja i određivanja veka trajanja alata u različitim proizvodnim uslovima.

Proaktivnost obradnih procesa, troškovi obrade i potrošnja energije u proizvodnim procesima zavise u velikoj meri od veličine sile trenja u zonama rezanja i intenziteta habanja reznih elemenata alata u predviđenim uslovima obrade.

Drugi problem koji se rešava savremenim istraživačkim programima odnosi se na određivanje veličine i karakteristika defektnog sloja materijala na obrađenim površinama predmeta obrade. Veličina i karakteristike ovog sloja utiču u velikoj meri na antihabajuća i antifrikcionala (tribološka) svojstva predmeta kome površina pripada, posebno ako je to klizna površina. Karakteristike i veličina defektnog sloja na obrađenim površinama predmeta obrade zavise od veličine radikalne komponente sile rezanja, koje deluju normalno na obrađenu površinu i od sile trenja koje se javljaju u zoni rezanja za vreme trajanja obradnih procesa.

Prof. dr Branko Ivković, dipl. ing.
Mašinski fakultet u Kragujevcu

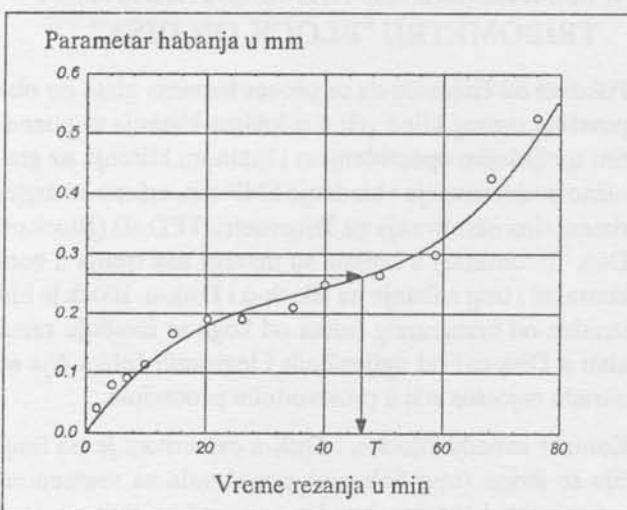
Razvoju metoda za efikasno i pouzdano određivanje obradivosti materijala, eksploatacijskih karakteristika alata i triboloških karakteristika sredstava za hlađenje i podmazivanje poklanjana je u proteklim decenijama velika pažnja, a utrošeno je mnogo vremena i sredstava. Međutim ovaj problem je i dalje nedovoljno rešen jer razvijene pouzdane metode nisu dovoljno efikasne, a efikasne metode nisu pouzdane.

U ovom radu prikazan je pokušaj da se modeliranjem kontakta između leđne površine alata i obrađene površine predmeta obrade na tribometru "Block on Disk" razvije efikasna i pouzdana metoda za ramantranje navedenih problema.

2. OSNOVI POSTOJEĆIH METODA ODREĐIVANJA OBRADIVOSTI MATERIJALA, EKSPLOATACIJSKIH Karakteristika Alata I Triboloških Svojstava Sredstava Za Hlađenje I Podmazivanje

Osnovna veličina kojima se određuju obradivost materijala, eksploatacijske karakteristike alata i tribološka svojstva sredstava za hlađenje i podmazivanje je "postojanost alata" odnosno vreme efektivnog rezanja do pojave kritične pohabanosti alata.

Pouzdana metoda za određivanje postojanosti alata sastoji se u neprekidnom rezanju materijala sa reznim alatom do pojave njegove kritične pohabanosti uz ili bez primene sredstva za hlađenje i podmazivanje. Dobijena postojanost alata služi kao mera obradivosti materijala, za određivanje eksploatacijske karakteristike alata ili za određivanje kvaliteta sredstava za hlađenje i podmazivanje sa tribološkog aspekta (antifrikcionih i antihabajućih svojstava SHP-a). Promenom uslova obrade, na primer, promenom brzine rezanja menja se i postojanost



Slika 1

alata pri konstantnim ostalim uslovima obrade što ukaže na relativnost ovih karakteristika. Da bi se odredila obradivost grupe konstrukcijskih materijala, na primer, neophodno je izvršiti njihovu obradu istim alatima uz korišćenje jednog sredstva za hlađenje i podmazivanje i to do pojave kritične pohabanosti alata. Upoređenjem ostvarene postojanosti alata utvrđuje se redosled materijala po njihovoj obradivosti. Da bi dobijeni rezultat bio pouzdan potrebno je ponoviti ispitivanje najmanje još jedan put.

Količina materijala koja se primenom ove metode za određivanje njihove obradivosti troši je ogromna kao i vreme ispitivanja. Međutim, ako se ovaj postupak ponovi nekoliko puta dobijaju se rezultati čija je pouzdanost izvanredna. Efikasnost i ekonomičnost metode su veoma niske.

Metodu je moguće koristiti i za uporedna ispitivanja više vrsta alata ili sredstava za hlađenje i podmazivanje. U ovim slučajevima koristi se jedna vrsta materijala predmeta obrade i na primer, jedna vrsta alata a menjaju se sredstva za hlađenje i podmazivanje.

Indeks obradivosti materijala **B** u odnosu na materijal **A** određen je odnosom ostvarenih postojanosti alata pri obradi oba materijala.

Na isti način određuju se indeksi kvaliteta alata i sredstava za hlađenje i podmazivanje. Ova metoda koristi se i danas u mnogim laboratorijama u ograničenom obimu i samo za proveru rezultata dobijenih takozvanim "brzim" metodama koje se odlikuju velikom efikasnošću ali im je pouzdanost slaba strana.

Brze metode su se, u proteklim decenijama razvijale na osnovu merenja promena pojedinih komponenti sile rezanja, temperatura rezanja i hraptavosti obrađenih površina sa promenom pohabanosti alata. Brojna izvedena istraživanja u ovim prvcima pokazala su da je moguće formirati indekse obradivosti materijala i antifrikcionih karakteristika sredstava za hlađenje i podmazivanje na osnovu merenja pojedinih komponenti sile rezanja ali da se oni ne podudaraju sa indeksima koji se formiraju na osnovu postojanosti alata. Utvrđeno je da postoje značajne razlike u promenama pojedinih komponenti sile rezanja, temperature i habanju alata sa vremenom rezanja.

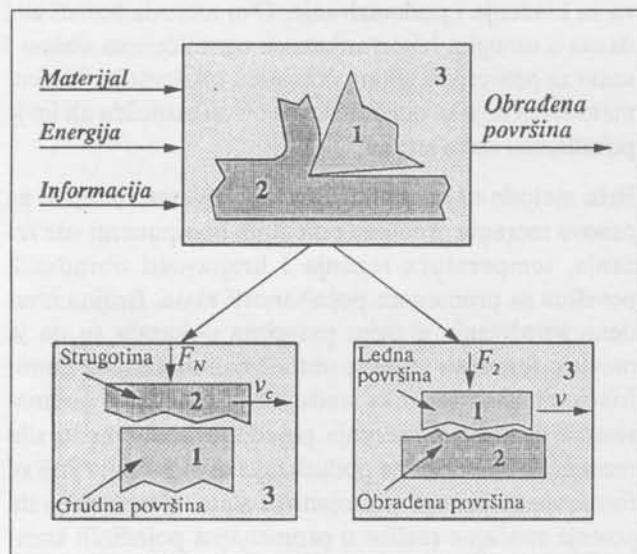
U Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu izveden je bio šezdesetih i sedamdesetih godina veliki broj eksperimenta u ovoj oblasti kroz realizaciju više naučno-istraživačkih programa, magistarskih i doktorskih radova. U ovoj laboratoriji je razvijena i korišćena dugo godina radioaktivna metoda za tribološka istraživanja u zoni rezanja koja se zasnivala na primeni površinske aktivacije (TLA Thin Layer Activation) na reznim alatima.

Sedamdesetih godina korišćeni su Ciklotroni sa spoljašnjim snopom u V. Britaniji i Nemačkoj za ozračivanje tankih slojeva materijala na leđnim površinama reznih elemenata alata. Habanjem leđne površine reznih elemenata alata smanjivao se radioaktivni sloj materijala. Merenjem opadanja radioaktivnosti alata u procesu rezanja praćen je razvoj procesa habanja za svo vreme rezanja. Velika osetljivost metode omogućavala je mereњe otpornosti alata na habanje odnosno vrlo efikasno merenje obradivosti materijala i kvaliteta alata i SHP-a sa tribološkog aspekta. Osnovna ograničenja za širu primenu ove metode su postojanje Ciklotrona sa spoljašnjim snopom i istraživača sa dovoljnim poznavanje nuklearne fizike.

3. OSNOVNI TRIBO-MEHANIČKI SISTEMI U ZONI REZANJA

Na postojanost alata utiču tribološki procesi koji se za vreme rezanja razvijaju u oba osnovna tribomehanička sistema odnosno u zonama kontakta spoljašnje strane strugotine i grudne površine alata i leđne površine alata i obrađene površine (slika 2)

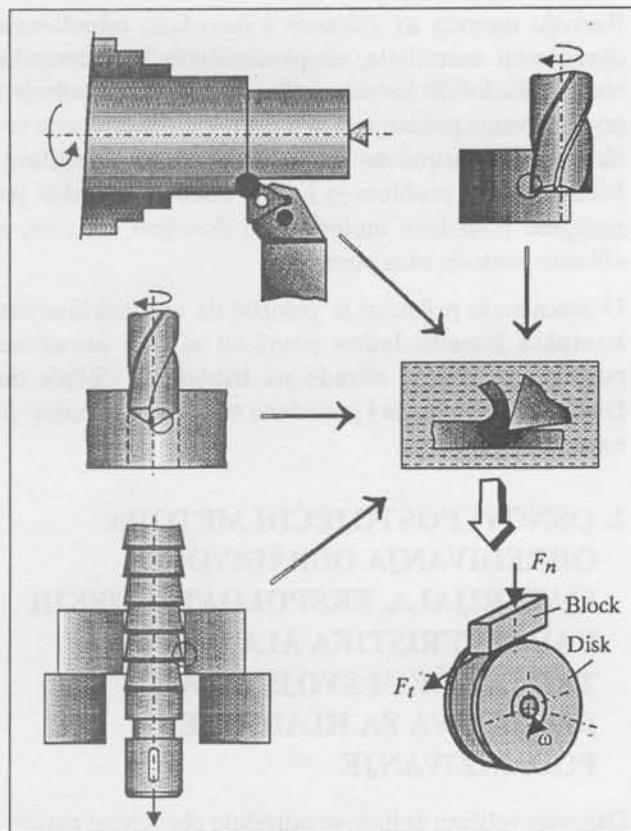
Kritična pohabanost alata kojom se određuje njegova postojanost odnosi se, po pravilu, na pohabanost leđne površine reznih elemenata alata. Na slici 3 prikazane su



Slika 2

osnovne vrste obrade rezanjem, koje se najviše koriste u proizvodnim procesima, a u kojima se tribološki procesi razvijaju u identičnim osnovnim tribomehaničkim sistemima.

U osnovnom tribomehaničkom sistemu u kome leđna površina reznog elementa alata klizi po obrađenoj površini brzinom rezanja "v" uz normalno opterećenje radijalnom komponentom sile rezanja, javljaju se kao posledica triboloških procesa sila trenja u pravcu glavnog



Slika 3

kretanja i proces habanja. Sredstvo za hlađenje i podmazivanje koje se, po pravilu, koristi u svim vrstama obrade rezanjem svojim antifrikcionim i antihabajućim svojstvima smanjuje силу trenja i usporava proces habanja alata za vreme rezanja.

Od svojstava materijala alata i predmeta obrade i triboloških karakteristika sredstava za hlađenje i podmazivanje zavise u određenim uslovima obrade intenzitet habanja alata odnosno njegova postojanost i količina energije koja se troši u procesu rezanja.

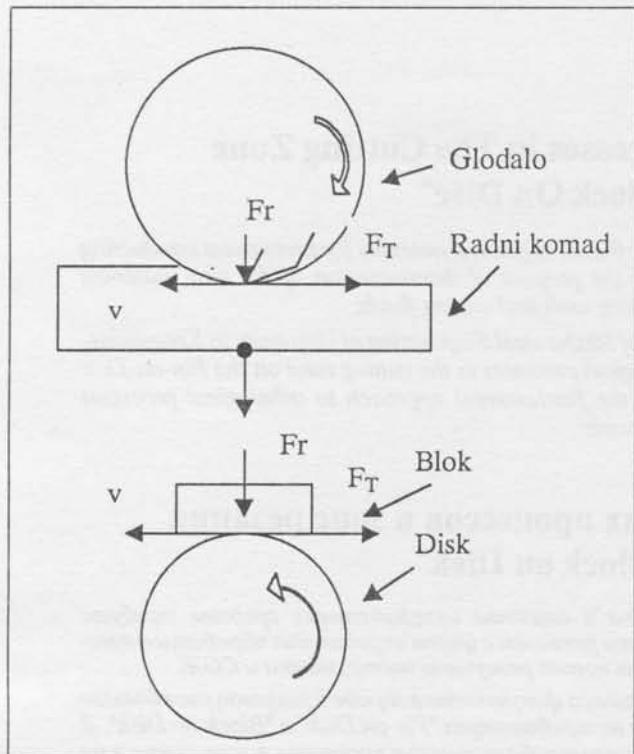
4. MODELIRANJE HABANJA ALATA NA TRIBOMETRU "BLOCK ON DISK"

Polazeći od činjenice da se proces habanja alata po obe površine reznog klina vrši u uslovima klizanja sa poznatim spoljašnjim opterećenjem i brzinom klizanja uz granično podmazivanje i hlađenje SHP-om, vršena su eksperimentalna istraživanja na Tribometru TPD-93 (Block on Disk Tribometar) u kojima su mereni sila trenja u zoni kontakta i trag habanja na Block-u i Disk-u. Block je bio izrađen od brzoreznog čelika od koga se izrađuju rezni alati a Disk-ovi od ugljeničnih i legiranih čelika čija se obrada najčešće vrši u proizvodnim procesima.

Kontakt između Block-a i Disk-a ostvarivan je po liniji čija se širina (trag habanja) povećavala sa vremenom ostvarivanja kontakta, kao što se povećava širina pojasa habanja na leđnoj površini reznog klina alata za vreme

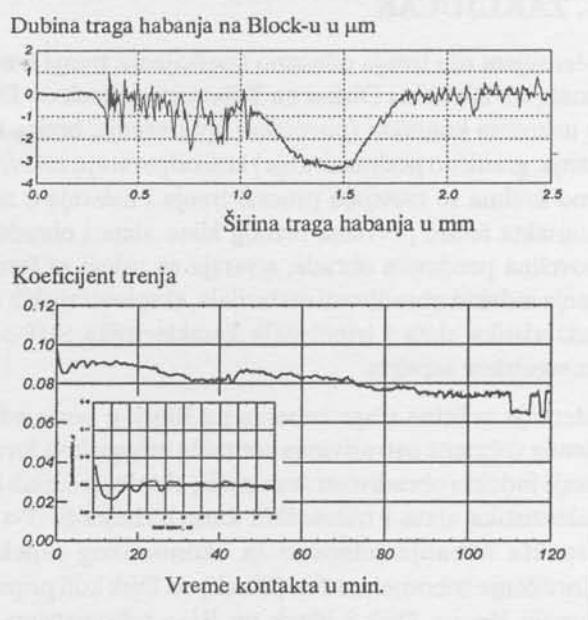
rezanja. Na slici 4 prikazano je modeliranje procesa obimnog glodanja na Tribometru Block on Disk.

U procesu obimnog glodanja maksimalna debљina strugotine ne prelazi 0.1 mm tako da se proces habanja razvija skoro isključivo na leđnoj površini reznih elemenata glodala. Radijalna komponenta sile rezanja deluje normalno na leđnu površinu reznih elemenata alata i kreće se, u zavisnosti od karakteristika materijala predmeta obrade i geometrije obrade, najčešće, između 15 i 30 daN . U savremenim obradnim procesima brzine rezanja pri glodanju (brzina klizanja leđne površine alata po obrađenoj površini) kreću se između 30 i 55 m/min . Uslovi pod kojima se kontakt između Block-a izrađenog od brzoreznog čelika i Disk-a izrađenog od materijala predmeta obrade određivani su prema vrsti obrade u kojoj se, na primer, koriste sredstva za hlađenje i podmazivanje čije se tribološke karakteristike ispituju. Spoljašnje normalno opterećenje i brzina klizanja na Tribometru određuju se prema veličini radijalne komponente sile rezanja koja se javlja u odgovarajućoj vrsti obrade.



Slika 4

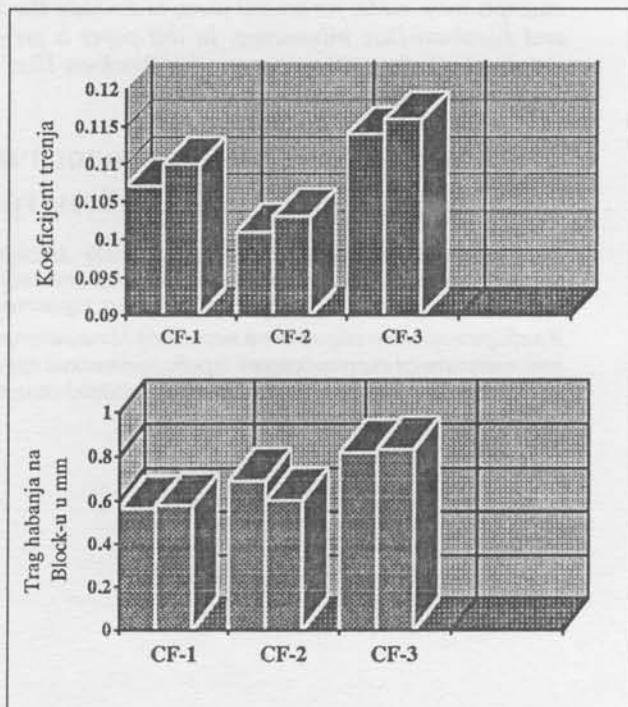
Sila trenja koja se na Tribometru Block on Disk izmeri odgovara sili trenja koja se u procesu rezanja javlja između leđne površine reznog klini i obrađene površine predmeta obrade. Na slici 5 prikazan je primer zapisa koeficijenta trenja dobijenog pri ispitivanju triboloških karakteristika jednog sredstva za hlađenje i podmazivanje zajedno sa tragom habanja na Block-u izmerenim na TalySurf No6.



Slika 5

Na osnovu izmerenih vrednosti koeficijenata trenja i širine tragova habanja pri korišćenju više vrsta SHP-a na Tribometru formiraju se indeksi kvaliteta sredstava za hlađenje i podmazivanje sa energetskog i ekonomskog aspekta. Na slici 6 prikazan je primer rezultata merenja sile trenja odnosno koeficijenta trenja i širine traga habanja dobijenih pri ispitivanju nekoliko vrsta polusinteških sredstava za hlađenje i podmazivanje.

Na osnovu ovako dobijenih rezultata formiraju se odgovarajući indeksi kvaliteta SHP-a.



Slika 6

5. ZAKLJUČAK

Merenjem sile trenja odnosno koeficijenta trenja u zoni kontakta Block-a i Disk-a na Tribometru Block on Disk u uslovima kontakta (normalno opterećenje, brzina klijanja, granično podmazivanje) koji odgovaraju uslovima pod kojima se razvijaju procesi trenja i habanja u zoni kontakta leđne površina reznog klina alata i obrađene površina predmeta obrade, stvaraju se uslovi za formiranje indeksa obradivosti materijala, eksploatacijskih karakteristika alata i triboloških karakteristika SHP-a sa energetskog aspekta.

Merenje veličine traga habanja na Block-u posle određenog vremena ostvarivanja kontakta omogućava formiranje indeksa obradivosti materijala, eksploatacijskih karakteristika alata i triboloških karakteristika SHP-a sa aspekta habanja odnosno sa ekonomskog aspekta. Korišćenje tribometara Pin (Block) on Disk koji pripada familiji Pin on Disk i Block on Ring tribometrima za ispitivanje triboloških karakteristika SHP-a i tvrdih

prevlaka na alatima je prisutno u sve većoj meri u odgovarajućim laboratorijama u razvijenim zemljama. Ispitivanje obradivosti materijala na tribometrima je, međutim, na samom početku.

LITERATURA

- [1.] B. Ivković, B. Tadić, Proceedings of Balkantrib'96, Tribometry and Tribodiagnostic, pp. 834, 1996, Thessaloniki, Greece.
- [2.] I. Mačužić, P. Todorović, B. Ivković, Tribological Characteristic of Cutting Fluid group, YUTRIB'97, 1977., Kopaonik, Yugoslavia.
- [3.] B. Ivković, Tribological Approach to Cutting Processes, J. Tribology in industry, Vol. XVII, №2, 1996.
- [4.] B. Ivković, D. Ješić, Machinability of Steels and ADI Runking Test on Tribometer Pin (Block) on Disk, Proceedings of World Tribology Congres, 1997, London.

Simulation of Tribological Processes in The Cutting Zone on Tribometer "Block On Disc"

Continuous development of new materials, tools and cutting fluids, imposes a necessity for permanent conducting of experimental research in the area of metal cutting, for the purpose of determination of the new materials machinability, and tribological characteristics of the new cutting tools and cutting fluids.

In the Laboratory for Metal Cutting and Tribology at Faculty of Mechanical Engineering of University in Kragujevac, attempts were made, for several years, to simulate the tribological processes in the cutting zone on the Pin-on-Disc and Block-on-Disc tribometers. In this paper is presented the fundamental approach to tribological processes simulation, in the cutting zone, on the "Block-on-Disc" tribometer.

Симулирование трибологических процессов в зоне резания на трибометре "Block on Disk"

Непрерывное развитие новых материалов, инструмента и смазочно охладительных средств требует постоянного экспериментального исследования обработки резанием с целью определения обрабатываемости новых материалов и трибологических характеристик нового режущего инструмента и СОЖ.

В лаборатории по обработке металлов Машиностроительного факультета в городе Крагуевац уже больше лет пытаются симулировать трибологические процессы на трибометрах "Pin on Disk" и "Block on Disk". В настоящей работе изложен основной подход симулированию трибологических процессов в зоне резания на трибометре "Block on Disk".