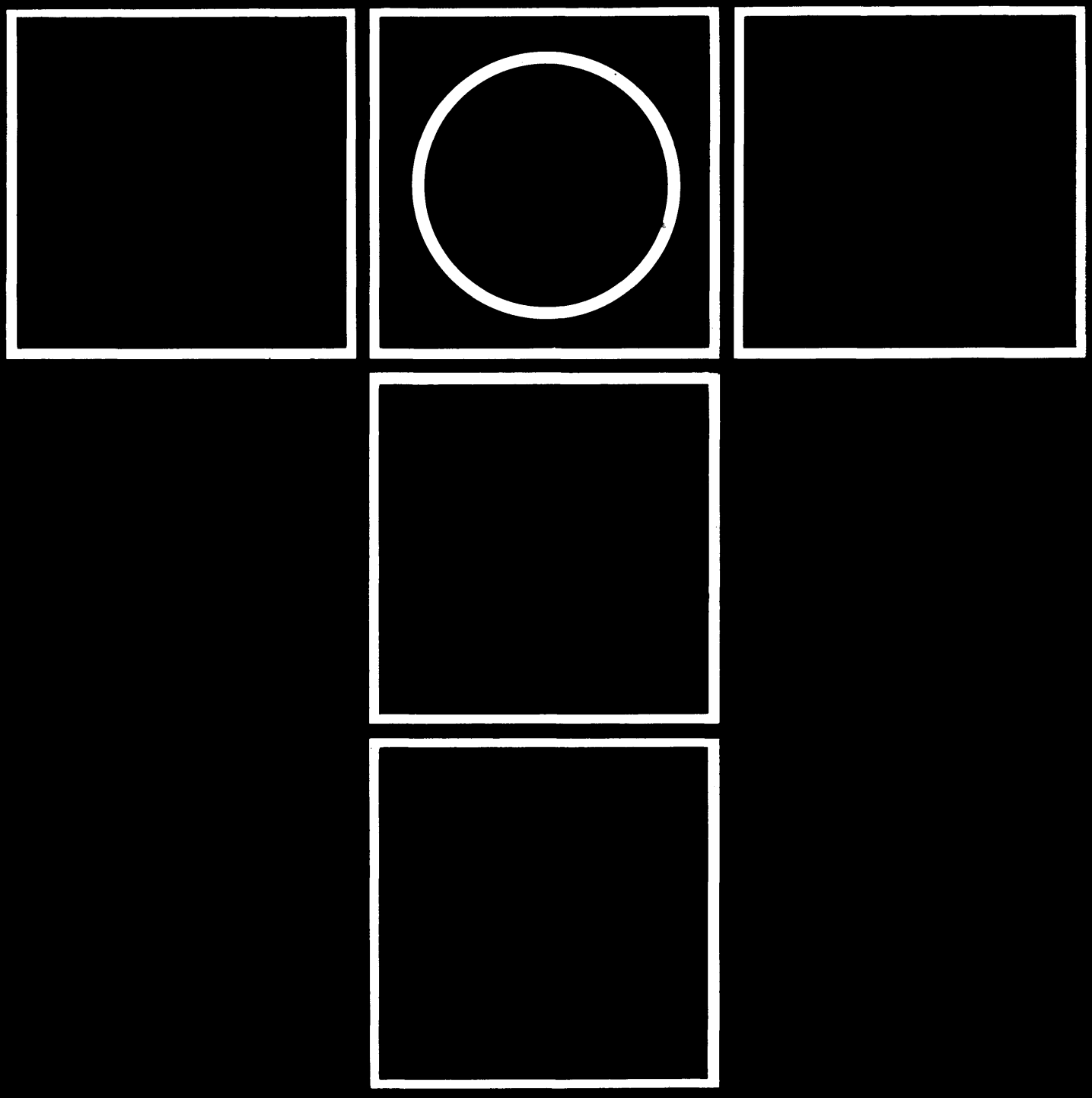
tribologija u industriji

YU ISSN 0351-1642
GODINA V
JUN 1983

2



Nauka i tehnologija o prenosu i rasipanju masa i energije u mehaničkim sistemima

YU ISSN 0351-1642

GODINA V
BROJ 2
JUNI 1983.

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ПЕРЕДОВИЦА

S. ŠAVAR: Tribologija i alatni strojevi — Tribology and machine tools — Трибология и металлообрабатывающие станки — — — — — — — — 35

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

S. ŽIVANOVIĆ, Z. KNEŽEVIĆ: Prilog analizi uticajnih faktora kod podmazivanja pri obradi prosecanjem i probijanjem — Contribution to analysis of influence factors at treatment throudh cutting and punching — К анализу решаящих факторов смазки при обработке прошивкой и пробивкой — 37

M. BABIĆ: Razvoj tribometra za istraživanje uticaja uslova obrade kontaktnih površina na vek trajanja elemenata tribomehaničkih sistema — The development of a tribometer for investigations of the effects of the conditions in machining of contact surfaces upon the life fo tribo-mechanical system elements — Развитие трибометра для исследования влияния условий обработки контактных поверхностей на долговечность деталей трибо-механических систем — — — — — — — — — — — — — — — — 43

O. V. BERESTNEV: Konstruisanje, proračun i ispitivanje samopodešljivih zupčanika — The desing, calculation, and testing of self-adjusting gears — Конструкция, расчеты и испытания само-регулирующихся зубчатых колес — 48

ZA NEPOSREDNU PRAKSU
FOR DIRECT PRACTICE
ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННУЮ
ПРАКТИКУ — 54

NOVOSTI
NEVS
ИЗВЕСТИЯ — 57

KNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ — 58

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ — 61

REZIMEA
ABSTRAKS
РЕЗЮМЕ — 63

Š. ŠAVAR

TRIBOLOGIJA I ALATNI STROJEVI

Razmišljajući o temi iz naslova, a poznavajući podatak iz Rezolucije o razvoju zemlje u 1983. godini koji glasi: »Rast industrijske proizvodnje od oko dva posto u odnosu na prethodnu godinu planiran je skromno, ali je prevagnulo opredeljenje da se predviđanja oslanjaju na stvarnost«, došao sam do saznanja da tribologija, alatni strojevi i produktivnost rada imaju vrlo jaku uzročnu vezu.

Naša stvarnost vezana uz produktivnost rada u industriji prikazana u postotcima kroz prosječne stope u vremenu od 1952. do 1982. po srednjoročnim razdobljima je stalno u opadanju (6,5 prema 2 posto). Proizvodnost rada u industriji za pojedine dijelove naše zemlje u 1982. godini u odnosu na 1981. godinu ostvarena je sa negativnim indeksom (SR Hrvatska 95,5%).

Pošto su, kao ključna pitanja razvoja naše zemlje naznačena (1) podizanje produktivnosti rada, (2) podizanje ukupne kvalitete ekonomičnosti privređivanja i (3) intenzifikacija privređivanja, razmotrit ćemo kako tribologija i alatni strojevi pomažu u ostvarivanju tih ciljeva.

TRIBOLOGIJA kao znanost treba da osigura, svojim razvojem i rješenjima koje pruža, ekonomičnost, sigurnost i neprekidnost rada različitih strojeva i uređaja, pa prema tome, i neprekidnost rada alatnih strojeva a pogotovo numerički upravljanih alatnih strojeva.

ALATNI STROJEVI su automatizirana visokoproduktivna sredstva rada koja služe za upravljanje alatom u procesu proizvodnje. Numerički upravljani alatni strojevi, uz to što imaju viši stupanj automatizacije, su sredstva rada (srednjeg i najvišeg tehnološkog nivoa — kompjuterom upravljani) ogromnih potencijalnih mogućnosti, a s punim iskorišćenjem kod nas radi tek jedna trećina dok se kod ostalih NU strojeva faktor iskorišćenja obično kreće u granicama između 0,3 do 0,5. Poznato je da je proizvodnost rada NU alatnih strojeva 3 do 5 puta veća od proizvodnosti rada na konvencionalnim strojevima. Isto tako znamo da se alatni strojevi koriste direktno za proizvodnju dobara u deset grana djelatnosti, dok u 43 industrijske grane posredno učestvuju u procesu proizvodnje a za održavanje sredstava rada koriste ih 44 industrijske grane od ukupno 45. Zbog toga je neophodno odigrati točnost izrade dijelova koji će odgovarati postavljenim zahtjevima a da pri tome obrađeni predmet bude što jeftiniji. Pored toga alatni strojevi kao i drugi uređaji obradnog sistema moraju u svom radu biti rentabilni i ekonomični. Da budu što ekonomičniji u procesu proizvodnje, oni moraju biti što manje izvan pogona, to znači da neprekidnost njihova rada jako utječe na faktor njihova iskorišćenja koji igra važnu ulogu u postizavanju što veće proizvodnosti. Zbog toga je neophodno da se rad na tim strojevima odvija neprekidno (rad u dvije smjene).

Vrlo visoki troškovi proizvodnje u obradi metala rezanjem u velikom dijelu su posljedica nedovoljnog poznavanja karaktera i razvoja triboloških pojava na površinama reznog dijela alata, na elementima alatnog stroja ali i neadekvatnih rješenja u smanjenju trenja i usporavanju procesa trošenja. Osim toga projektiraju se mnoga tehnološka rješenja, a da se o triboloških pojavama na površinama alata i alatnog stroja nije dovoljno vodilo računa.

Zadaća alatnog stroja je da ostvari relativno kretanje alata prema obratku. Svi alatni strojevi imaju zajedničke sastavne elemente koji su po konstrukciji u načelu jednaki i kod kojih su prisutne tribološke pojave. Sa gledišta tribomehanike to znači razdvajanje površina u kontaktu i relativnom kretanju mazivim slojevima radi smanjenja trenja i usporavanja ili potpunog uklanjanja trošenja. Najvažniji dijelovi su: klizni i kotrljajući ležajevi, zupčanici, vodilice, kulise i poluge sa zglobom, zupčaste letve i navojna vretena, te različite vrste hidrauličkih prenosnika.

Za ležajeve sa klizanjem i kotrljanjem kod alatnih strojeva značajno je da imaju veliki broj okretaja, što je potrebno zbog većih brzina rada pa prema tome i veće efikasnosti. Istovremeno u ležištima su potrebni što manji zazori koji kod obrade iziskuju željenu točnost, da bi bili dostignuti mikrogeometrijski točni oblici kod mikrogeometrijski točnih površina.

Ove okolnosti iziskuju posebne uvjete u pogledu načina podmazivanja i vrste odnosno kvalitete maziva.

Trenje kotrljanja javlja se obično u osloncima vretena koje nose predmet obrade i alat i okreću se velikim brojem okretaja u jedinici vremena.

Trenje klizanja javlja se na velikom broju površina koje pripadaju nosačima alata ili predmeta obrade kada se ovi okreću malim brzinama. Broj kontaktnih površina na kojima se javlja trenje klizanja ovisi u prvom redu o broju alata koji se koriste za vršenje obrade u proizvodnoj operaciji.

Prijenosnici za glavno i pomoćno kretanje alatnih strojeva sastoji se, u većini slučajeva, iz brojnih zupčastih parova sa čeonim konusima i pužastim zupčanicima. O njihovom podmazivanju ovom prilikom ne bih govorio već samo to da se kod zahvatanja zubaca pojavljuje djelomično trenje kotrljanja a djelomično trenje klizanja. Veliko opterećenje filma nastaje zbog razmjerno malih dodirnih površina iz čega proizilazi zahtjev za uljem sa dobrom prionljivošću. Taj zahtjev i problemi trenja predstavljaju dio tribološke problematike alatnog stroja.

Vrlo je često u konstrukciji alatnih strojeva prisutan kinematski par sastavljen od navojnog vretena i odgovarajuće matice (pokretanje radnog stola glodala ili nosača alata na tokarilici).

Vođice, a naročito kod vođica za duge stolove potrebno je spriječiti triboloških sredstvima polarnih osobina stepenasto trošenje (stick-slip) koje se javlja zbog nedovoljnog podmazivanja odnosno nepravilnog izbora tribološkog sredstva. Ovo naročito važi za vertikalne vođice.

Prema tribofizici, trenje je vrlo kompleksna pojava koja je u velikoj mjeri zavisna od vrste parova materijala, njihove mehaničke otpornosti i tvrdoće te mikro i submikrogeometrije površina i dr. Teorija dislokacija kristalne strukture materijala pruža pri tome mogućnost svestranijeg poznavanja problema.

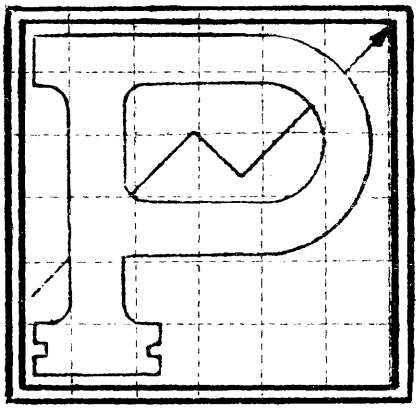
Tribomehanika je oblast radne tribologije koja proučava teoretske osnove i tehnička rješenja koja nam trebaju omogućiti stvaranje mazivnih slojeva različitih debljina za potpuno razdvajanje površine u kontaktu i relativnom kretanju. Suvremeni principi (hidrodinamičkog i hidrostatičkog) podmaziavnja, uz primjenu suvremenih uređaja za podmazivanje, regulaciju i kontrolu, mogu smanjiti otpore uslijed trenja i istrošenja uslijed kontakta površina na vrlo malu vrijednost.

Tribološke pojave na površinama reznog dijela alata jednostavnije su po obliku ali zato imaju vrlo složenu prirodu. Razvoj procesa trošenja na reznim elementima alata zavisi od mnogo faktora kojima su obuhvaćene osobine materijala alata i obratka, uvjeti rada i geometrijske karakteristike reznog dijela, vrsta i kvaliteta sredstava za hlađenje i podmazivanje. Zajedničko djelovanje spomenutih utjecajnih faktora uvjetuje da nastaju različiti vidovi trošenja: abrazivno, adheziono, difuziono, koroziono itd. Najčešći slučaj je da su istovremeno prisutni svi vidovi trošenja čime je otežano istraživanje svakog posebno.

Sa tehničkog stanovništva isrtošenost je promjena prvobitnih tehničkih osobina alata i alatnog stroja a sa ekonomske strane to je gubitak vrijednosti i prenos ove vrijednosti u vrijednost proizvoda. Ako knjigovodstveno otpisujemo manje od stvarno nastalog trošenja osnovnih sredstava u procesu proizvodnje nastati će skriveni gubitak koji će se pojaviti prilikom rashodovanja tih osnovnih sredstava.

Ekonomski aspekt trošenja nije samo u otpisivanju vrijednosti alatnih strojeva već u mogućim uštedama koje donosi produženje vijeka trajanja alata, produženje vremenskog toka istrošenosti alatnog stroja, povećanje brzine rezanja a time i proizvodnosti rada.

Privedimo ova razmišljanja završetku i kažimo da su vrlo raznovrsni i brojni zahvati kod alatnog stroja koji bi imali za posljedicu smanjenje triboloških gubitaka. Prvo, tu je pravilan izbor triboloških sredstva te njegova pravilna primjena u eksploataciji, koja osigurava najveću moguću sigurnost pri radu, kvalitetu obrade, najmanji utrošak snage a time smanjenje broja i veličine popravaka. Drugo, planskim održavajnem i neophodnim uklanjanjem iznenadnih kvarova možemo znatno produžiti vremenski tok istrošenosti alatnog stroja, jer već kod beznačajnog istrošenja postoje nesposoban za rad u granicama propisane tehnološke točnosti.



Publikacija izlazi dvanaest puta godišnje.
Prodaja isključivo u pretplati.

PRODUKTIVNOST U INDUSTRIJI 1

kod nas i u svetu | **GODINA I januar '83**

Bitka za uvećanje produktivnosti u svetu odavno je otpočela. Zato i nije čudo što se u privrednim krugovima, pogotovu razvijenih zemalja, kaže:

PRODUKTIVNOST JE KLJUČ BUDUĆNOSTI.

CENTAR ZA PRODUKTIVNOST RADA pokrenuo je publikaciju

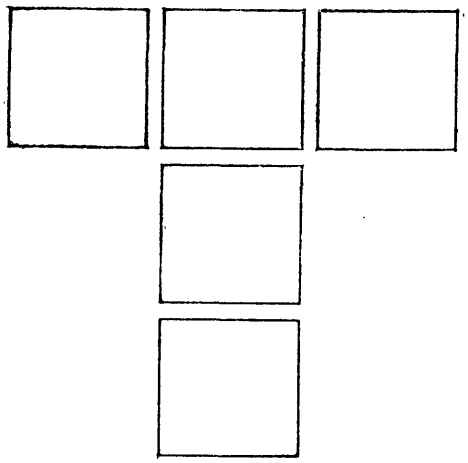
Produktivnost u industriji

Publikacija izlazi dvanaest puta godišnje.
Godišnja pretplata — 1.200 dinara.
Pretplatu slati na adresu:
CENTAR ZA PRODUKTIVNOST RADA
MAŠINSKI FAKULTET
34000 KRAGUJEVAC
Ul. Sestre Janjić br. 6

Ko raspolaže informacijama može da donosi valjane odluke

UDK: 621.7.01.014:621.77.06

STEVAN ŽIVANOVIĆ
ZDRAVKO KNEŽEVIĆ*



Prilog analizi uticajnih faktora kod podmazivanja pri obradi prosjecanjem i probijanjem**

1. UVOD

Dosadašnja istraživanja ukazuju da je veliki broj faktora koji utiču na postojanost i vijek trajanja alata. Ovi uticajni faktori mogu se svrstati u tri osnovne grupe i to:

— uticajni faktori koji zavise od same mašine,

— uticajni faktori koji zavise od alata i

— uticajni faktori koji zavise od obradka i vrste maziva.

Na osnovu navedenih uticajnih faktora, vremenska postojanost alata može se definisati izrazom.

$$T = N\ t_c \qquad (1)$$

gdje je:

T — vremenska postojanost alata, definisana kao vremenski period između dva uzastopna oštrenja alata.

N — količinska postojanost alata, odnosno broj izrađenih izradaka postupkom prosjecanja i probijanja između dva oštrenja.

t_c — vrijeme u kome se obavi jedan radni ciklus izvršnog dijela mašine, a pri tome se obavi izrada jednog izredka.

Ako se pod vijekom alata podrazumjeva period njegove neprekidne eksploatacije, bez drugih intervencija osim oštrenja, tada je vremenski vijek alata:

$$V_T = (x + 1)\ T \qquad (2)$$

gdje je:

V_T — vremenski vijek alata

x — broj oštrenja alata u toku njegove eksploatacije

Iz obrasca (2) se vidi da je vremenski vijek alata tim veći što je veća vremenska postojanost alata, odnosno što je duže vrijeme između dva uzastopna oštrenja alata.

Uzimajući materijal obrade kao konstantnu veličinu, u ovom radu će se ukazati na neke faktore, koji su do danas bili nedovoljno proučeni, a koji bitno utiču na fenomen triboloških promjena reznih elemenata alata za prosjecanje i probijanje, odnosno na vijek trajanja alata.

2. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA UTICAJNIH FAKTORA

U radu (3) predloženo je da se jedinično trošenje (z) reznih ivica alata za prosjecanje i probijanje u njegovoj proizvoljnoj tački za vrijeme jednog radnog ciklusa proračunava po obrascu:

$$z = A \int_0^{B\varphi_r} \left[\frac{1+\mathrm{tg}^2\,(2\alpha+2\rho)}{1+\mathrm{tg}^2\,2} - 1 \right] a\varphi^n{}_r\ d\varphi_r \qquad (3)$$

gdje je:

A — koeficijent koji određuje zavisnost između jediničnog rada trenja i jediničnog habanja

B — koeficijent koji određuje zavisnost između vrijednosti intenziteta deformacije do trenutka gubitka stabilnosti u procesu prosjecanja, uz uzimanje u obzir trenja i vrijednosti deformacije do trenutka stabilnosti u procesu jednoosnog zatezanja.

α — ugao između pravca glavnog napona i normale na razmatranu površinu.

ρ — ugao trenja.

a — konstanta materijala.

n — koeficijenat očvršćavanja.

φ_r — deformacija (logaritamska) u procesu zatezanja.

* Dr Stevan Živanović, dipl. maš. inž., redovni profesor Mašinskog fakulteta Banjaluka.
Mr Zdravko Knežević, dipl. maš. inž., SOUR — »Rudi Čajavec« RO — Proizvodnja alata i održavanje sredstava.

** Rad obuhvata dio istraživanja u okviru republike naučne teme »Primjena novih konstrukcija i tehnologija izrada alata za obradu lima deformisanjem«, koju finansira Republička zajednica nauke SR BiH i SOUR — »Rudi Čajavec« u Banjaluci.

Iz obrasca proizilazi da je trošenje alata u toliko manje u koliko je manji koeficijenat trenja i rad plastične deformacije za vrijeme prosjecanja i probijanja koji, u određenim uslovima može biti predstavljen radom plastične deformacije u procesu jednoosnog zatezanja. Ova konstatacija potvrđuje zapažanja da je za isti materijal, debljinu i dužinu prosjecanja maksimalna sila skoro proporcionalna radu plastične deformacije. Iz ovog slijedi da maksimalna sila prosjecanja i probijanja direktno utiče na intezitet trošenja reznih elemenata alata.

Koristeći ovu činjenicu primjenjena je jedna nova metoda za određivanje inteziteta trošenja reznih elemenata alata, tj. preko maksimalne sile probijanja F_{max}.

Pri ovom ispitivanju varirani su slijedeći ulazni parametri:

1. vrsta materijala koji je prosjecan odnosno probijan,
2. debljina materijala,
3. zazor,
4. vrsta maziva,
5. brzina deformisanja.

Istraživanja su vršena sa tri vrste materijala i to:

— čelik Č.0148, debljina lima 2 mm
— mesing CuZn 37 tvrdi, debljina lima 2 mm
— aluminij Al Mg 3.24 polutvrdi, debljina lima 1,5 mm.

Zazor (dvostruka zračnost) je mijenjan u granicama od 1,25 do 17% debljine lima.

U ovom istraživanju su korišćeni rezultati koji se odnose na zazore: 1,25; 2,5; 5; 6,25; 7,5; 10; 12,5; 15 i 17.

Istraživanja su vršena bez podmazivanja i sa podmazivanjem alata i materijala obrade pri čemu je korišćeno nekoliko vrsta mineralnih ulja, domaće i strane proizvodnje:

1. »Sunit — ST90« firme Klüber, SAV. REP. NEMAČKA
2. »Almaplex«, rafinerija ulja MODRIČA
3. »PRES — 419EP«, rafinerija ulja KRUŠEVAC
4. »MOLUB — FŠ«, rafinerija ulja MODRIČA
5. »ATOMÖL« — Curtis — ŠVAJCARSKA.

Ulje pod rednim brojem 3 je korišćeno kao uljna emulzija tj. ulje — voda (u odnosu 1:5), dok su ostala ulja korišćena kao čista mineralna ulja sa EP — aditivima.

Istraživanja su vršena sa više brzina deformisanja i to: 0,00083; 0,00167; 0,0025 i 0,004 (m/s).

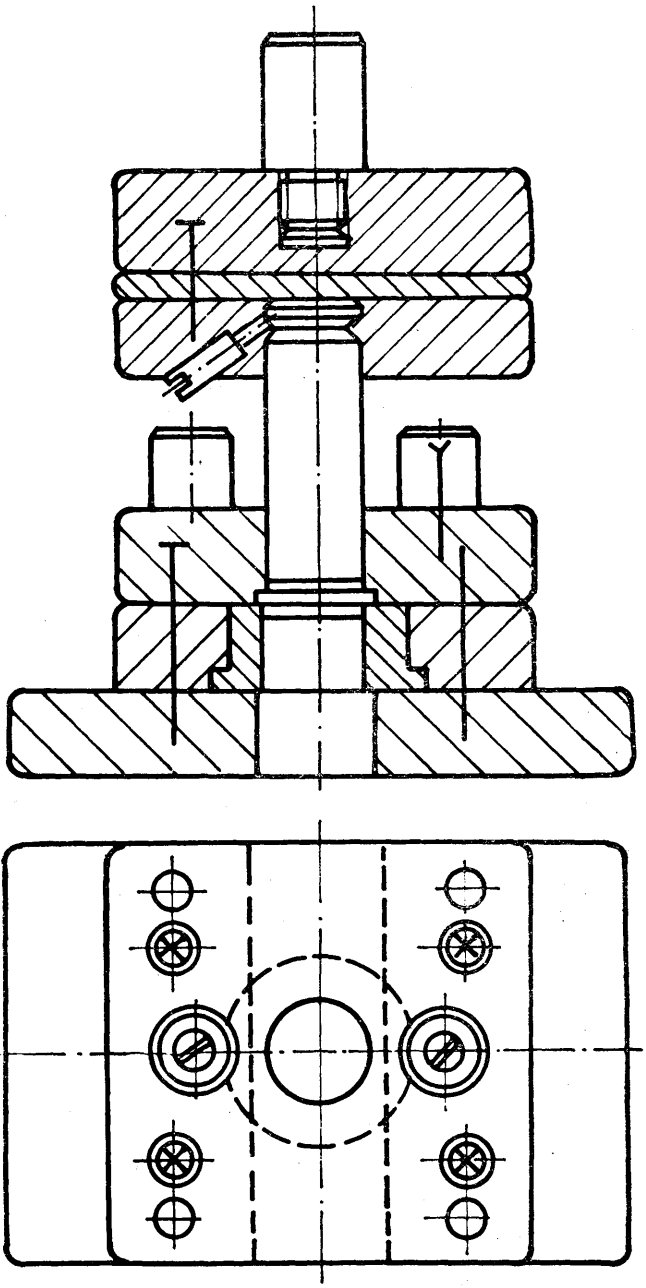
Istraživanja su vršena alatom za probijanje (sl. 1). Alat je izrađen sa promjenljivim prosjekačima, odnosno sa različitim zazorima. Materijal prosjekača i rezne ploče je visokolegirani alatni čelik Č. 4150, kaljen na 62 HRC.

Istraživanja su vršena na univerzalnoj mašini za mehanička ispitivanja materijala Wolpert.

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Za ispitivanje maksimalne sile presjecanja, konstruisan je i izrađen alat sa promjenljivim zazorima (sl. 1).

Prvo je vršeno istraživanje promjene maksimalne sile prosjecanja bez podmazivanja alata odnosno materijala obrade. Nakon završenog istraživanja sile prosjecanja bez

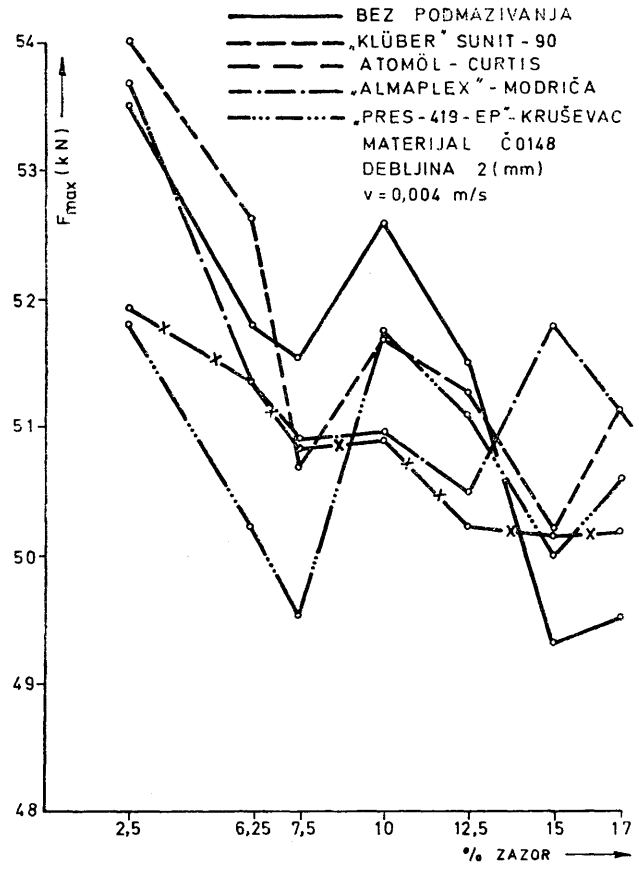


Sl. 1. Alat za ispitivanje sile prosjecanja i probijanja

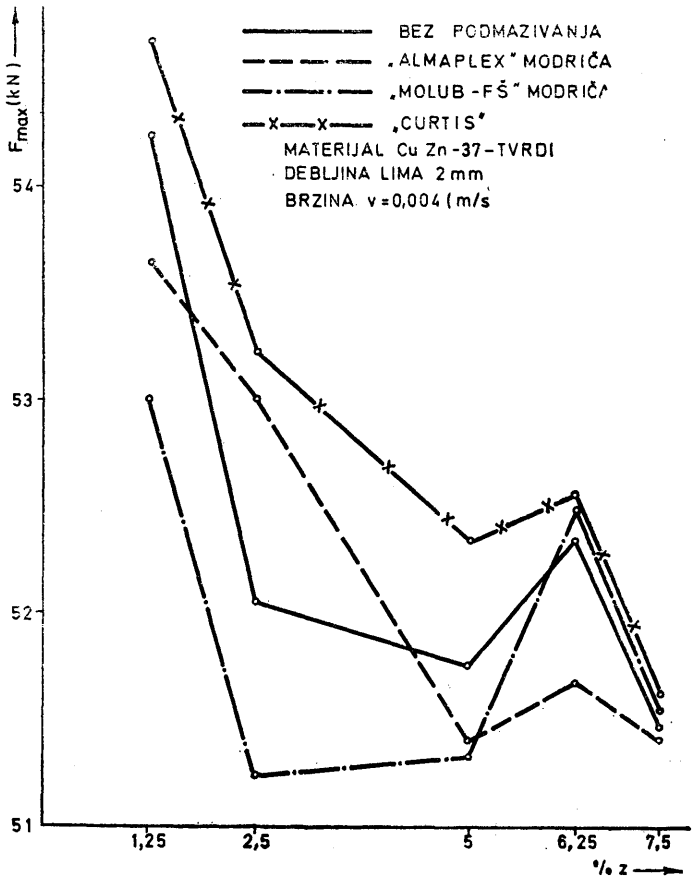
podmazivanja istraživana je sila prosjecanja sa podmazivanjem. Istraživanja su rađena sa pet vrsta tehnoloških ulja.

Princip istraživanja je primjenjen isti kao i kod istraživanja bez podmazivanja, međutim kod ovog istraživanja ustanovljeno je da nakon promjene određenog ulja treba prebrisati alat i materijal obrade. Na sl. 2 su prikazani rezultati istraživanja promjene maksimalne sile prosjecanja, na materijalu Č. 0148 gdje ordinata predstavlja srednje aritmetičke vrijednosti maksimalne sile prosjecanja (F_{max}), a apscisa zazor (z), tj. procentualnu vrijednost zazora u odnosu na debljinu lima.

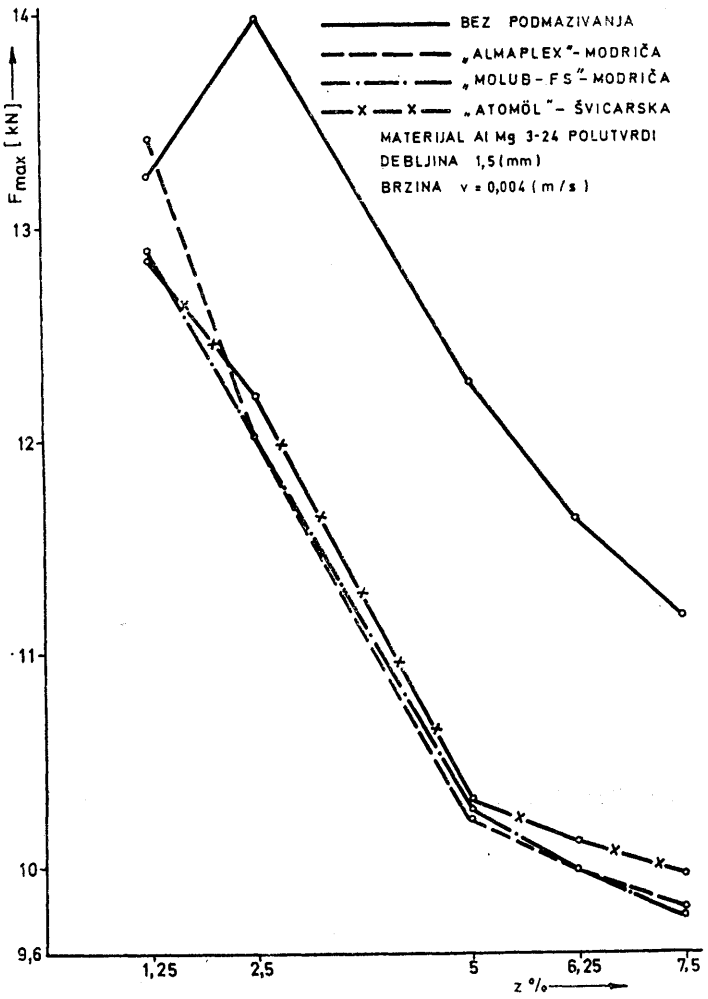
Slika 3 prikazuje promjenu maksimalne sile prosjecanja u zavisnosti od vrste ulja i veličine zazora za materijal CuZn Čl. 45 (tvrdi), dok sl. 4 prikazuje promjenu maksimalne sile probijanja u zavisnosti od vrste ulja i zazora za materijal Al Mg 3.24 (polutvrdi).



Sl. 2. Promjena maksimalne sile prosjecanja čelika pri promjeni zazora i vrste ulja za podmazivanje



Sl. 3. Promjena maksimalne sile prosjecanja mesinga u zavisnosti od vrste ulja za podmazivanje i zazora



Sl. 4. Promjena maksimalne sile prosjecanja Al Mg 3 — 24

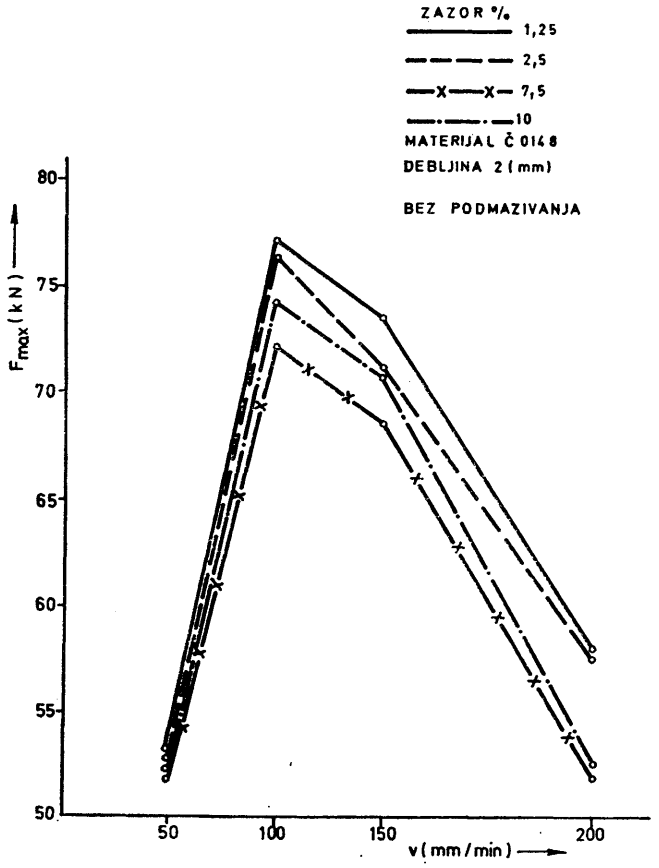
Istraživanja promjene maksimalne sile prosjecanja pri promjeni brzine izvođena su na mašini za mehanička ispitivanja materijala »Wolpert«.

Istraživanja sa podmazivanjem alata vršena su sa pet vrsta ulja, pri čemu je najveća pažnja posvećena mineralnim uljima za fino štancanje »MOLUBFŠ« — rafinerije ulja Modriča i »Atomöl« — Švajcarska.

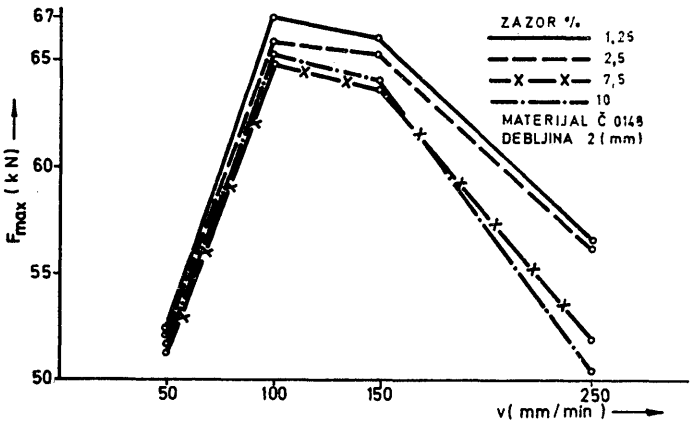
Obradci su bili od tri osnovne vrste materijala: čelika, mesinga i aluminija.

Sl. 5, 6 i 7 prikazuju promjenu maksimalne sile prosjecanja za čelik Č. 0148 pri promjeni brzine prosjecanja,

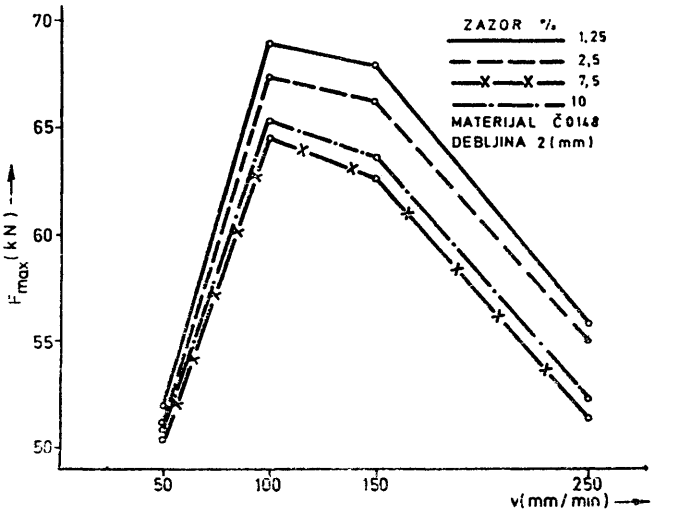
DA LI STE SE PRETPLATILI
NA PUBLIKACIJU
PRODUKTIVNOST
U INDUSTRIJI?



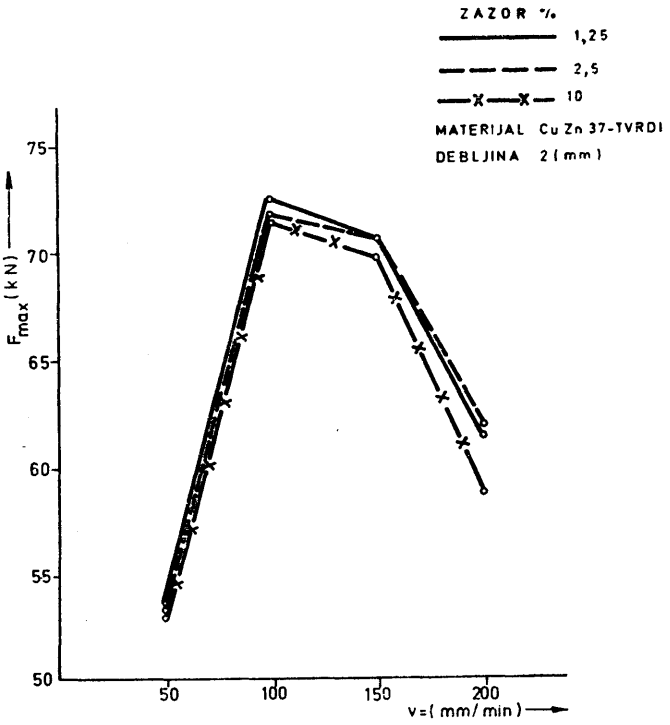
Sl. 5. Promjena maksimalne sile prosjecanja pri promjeni brzine prosjecanja



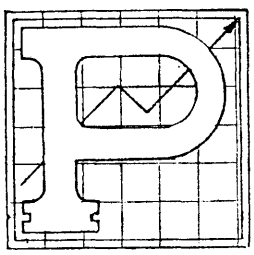
Sl. 6. Promjena maksimalne sile prosjecanja pri promjeni brzine prosjecanja kod podmazivanja uljem »Atomöl« — Curtis



Sl. 7. Promjena maksimalne sile prosjecanja pri promjeni brzine prosjecanja kod podmazivanja uljem »Molub-FŠ«



Sl. 8. Promjena maksimalne sile prosjecanja pri promjeni brzine prosjecanja mesinga bez podmazivanja

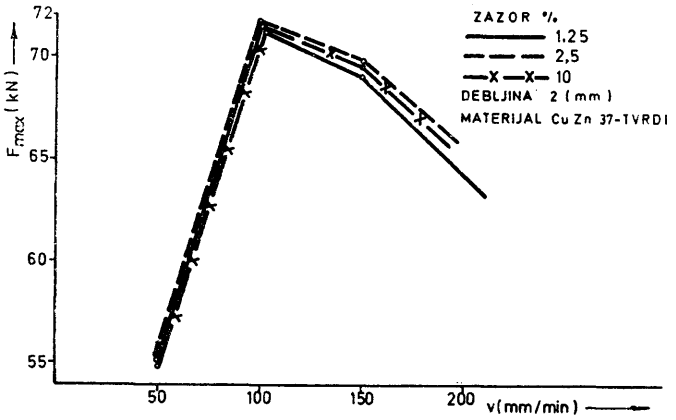


ZAPAMTITE OVAJ ZNAK

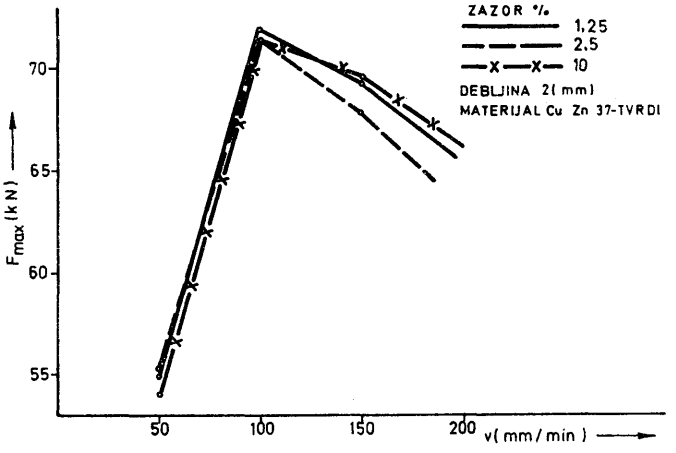
Produktivnost je ključ za budućnost

bez podmazivanja alata i sa podmazivanjem navedenim mineralnim uljima.

Slike 8, 9 i 10 prikazuju promjenu sile prosjecanja za materijal CuZn 37 — Č. 45 (tvrdi) pri promjeni brzine prosjecanja, dok sl. 11 prikazuje promjenu sile prosjecanja za materijal Al Mg 3 — 24 (polutvrdi) pri promjeni brzine deformisanja.



Sl. 9. Promjena maksimalne sile prosjecanja pri promjeni brzine prosjecanja mesinga kod podmazivanja uljem »Atomöl« — Curtis

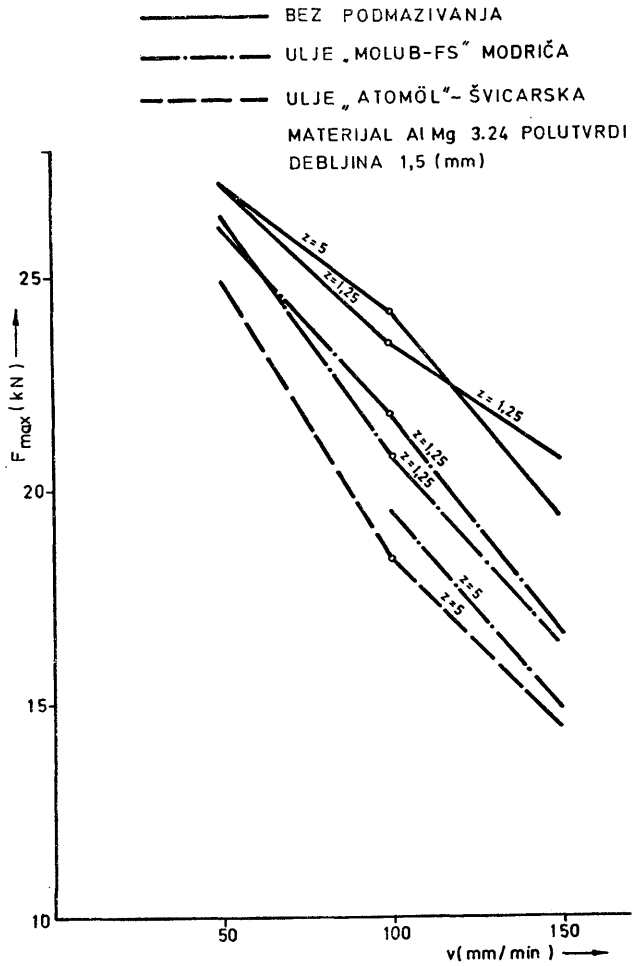


Sl. 10. Promjena maksimalne sile prosjecanja pri promjeni brzine prosjecanja mesinga kod podmazivanja uljem »Molub-FŠ«

4. ANALIZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Istraživanja su pokazala da se sa podmazivanjem alata pravilno odabranim tehnološkim uljem znatno smanjuje sila deformisanja, odnosno produženje vijeka trajanja alata. Iz sl. 2 je vidljivo da se najveća trajnost alata postiže podmazivanjem alata uljnom emulzijom (ulje »Pres 419 EP«), dok je trajnost alata nešto manja pri podmazivanju mineralnim uljima. No, za ovo postoji slijedeće objašnjenje.

Pri prosjecanju ili probijanju lima javljaju se na kontaktnim površinama visoki pritisci i povišene temperature. Pri ovako visokim pritiscima i temperaturama dolazi do intenzivnog trošenja alata tj. prosjekača i rezne ploče, kao i pojave srha na izradku. Sredstva za hlađenje i podmazivanje imaju u ovom slučaju osnovni zadatak da odvode toplotu koja se razvija u zoni prosjecanja ili probijanja i da smanje trenje na kontaktnim površinama alata i materijala.



Sl. 11. Promjena maksimalne sile prosjecanja pri promjeni brzine prosjecanja Al Mg 3.24 kod podmazivanja

Efikasno hlađenje može se postići sa fluidom koji ima visoku termičku provodljivost i veliku specifičnu toplotu. Voda ispunjava oba ova zahtjeva, ali su njena podmazujuća svojstva izrazito slaba, a koroziona moć kod metalnih površina veoma velika.

Mineralno ulje ima izvanredna podmazujuća svojstva, djeluje antikoroziono na elemente mašina, ali su termička provodljivost i specifična toplota znatno slabijo u odnosu na vodu.

Efikasnost hlađenja sa mineralnim uljima može biti poboljšana do izvjesne mjere smanjenjem njihove gustine, jer sa rjeđim uljem obezbeđuje se veći protok pa prema tome i odvođenje veće količine toplote. Osnovni način da se ovo postigne sastoji se u dodavanju vodi određene količine mineralnog ulja tj. formiranju uljnih emulzija. Prema tome, uljne emulzije primjenjuju se u proizvodnim operacijama u kojima su brzine deformisanja (porsjecanja i probijanja) visoke a pritisci na kontaktnim površinama reznog elementa alata i materijala obrade mali. Međutim, bez obzira na dobre osobine uljnih emulzija, one se ne mogu primjenjivati tamo gdje su pritisci na kontaktnim površinama visoki (fino štancanje) već se mora primjeniti mineralno ulje sa određenim aditivima.

Veličina zazora ima velik uticaj na veličinu sile deformisanja, odnosno na trajnost alata. Iz slika 2, 3 i 4 se vidi da je maksimalna sila najveća pri najmanjem zazoru. Pri porastu zazora sila deformisanja opada, ali ne opada linerno. Naime, iz slika 2, 3 i 4 se vidi da postoje određeni zazori kod kojih je sila probijanja i prosjecanja najmanja, zavisno od vrste materijala.

Ovi optimumi, koji su po prvi put definisani u radu (3), su vrlo značajni, jer konstruktori alata koristeći ih (jasno, ako kvalitet izradka to dozvoljava) uz primjenu odgovarajućeg ulja, odnosno uljne emulzije za podmazivanje alata, postiže se najmanja sila deformisanja, odnosno postiže se najveća trajnost alata što je inače krajnji cilj.

Na osnovu rezultata istraživanja, može se zaključiti da brzina deformisanja snažno utiče na smanjenje sile prosjecanja i probijanja, odnosno na trajnost i vijek alata.

Istraživanja takođe pokazuju da sa porastom brzine prosjecanja i probijanja do određene vrijednosti, maksimalna sila raste, da bi poslije te brzine opadala.

Drugim rječima, sa porastom brzine prosjecanja i probijanja do određene vrijednosti trajnost alata opada, da bi nakon te antioptimalne brzine trajnost alata počela da raste.

Treba napomenuti da su istraživanja vršena u određenom području brzina, te se i zaključci odnose na to područje.

5. ZAKLJUČCI

Na osnovu izvršenih istraživanja mogu se izvući slijedeći zaključci:

1. Sila prosjecanja i probijanja F_{max}, kao veličina neposredno uticajna na trošenje reznih elemenata alata, znatno je niža kod podmazivanja alata odgovarajućim mineralnim uljima, odnosno uljnom emulzijom u odnosu na silu prosjecanja i probijanja bez podmazivanja reznih elemenata alata. Dakle, za duži vijek alata i bolji kvalitet izradka podmazivanje alata je neophodno.

2. Kod prosjecanja i probijanja lima od čelika, mesinga i aluminijuma postoje određeni zazori kod kojih je sila probijanja i prosjecanja najmanja u odnosu na susjedne zazore. Pri konstruisanju alata treba konstrukciju alata prilagoditi ovim zazorima uzimajući u obzir kvalitet izradka.

3. Pri porastu brzine prosjecanja i probijanja, sila ne raste linearno, već nakon određene vrijednosti brzine. sila poprima tendenciju opadanja odnosno tendenciju porasta trajanja vijeka alata.

4. Nepobitno je dokazano da sa podmazivanjem reznih elemenata alata trajnost alata raste, što treba da obavezuje proizvođače mašina za plastičnu deformaciju metala da obavezno na mašine ugrađuju sisteme za podmazivanje alata.

LITERATURA

1. POPOVIĆ P., JANKOVIĆ LJ., Prilog razmatranju problema veka alata za prosecanje i probijanje. Obrada deformacijom u mašinstvu br. 2, Novi Sad, 1976.
2. ŽIVANOVIĆ S., Korelacija dvojnog optimuma i podmazivanja u procesu prosjecanja. Obrada deformisanjem u mašinstvu br. 6, Novi Sad, 1980.
3. ŽIVANOVIĆ S., Usavršavanje procesa prosjecanja i probijanja kroz primjenu teorije dvojnog optimuma. Zbornik radova XIV savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Čačak 1980.
4. IVKOVIĆ B., Tribologija rezanja. Sredstva za hlađenje i podmazivanje, Beograd, 1979.
5. IVKOVIĆ B., Analiza razvoja proizvodnje i primjene sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi metala rezanjem. Mašinski fakultet — Kragujevac, 1975.
6. REBEC B., Prilog analizi uticajnih faktora i njihovih interakcija pri istrošenju reznih oštrica alata — štance u cilju povećanja trajnosti sljedbenog reza u pogonskim uvjetima. Doktorska disertacija — Fakultet strojarstva i brodogradnje — Zagreb, 1976.
7. KNEŽEVIĆ Z., Analiza faktora kod podmazivanja radnog dijela alata u obradi plastičnom deformacijom. Magistarski rad, Zagreb 1981.
8. KATALOG, Maziva Rafinerija ulja — Modriča.

NOVO
NOVO
NOVO
NOVO
NOVO
NOVO

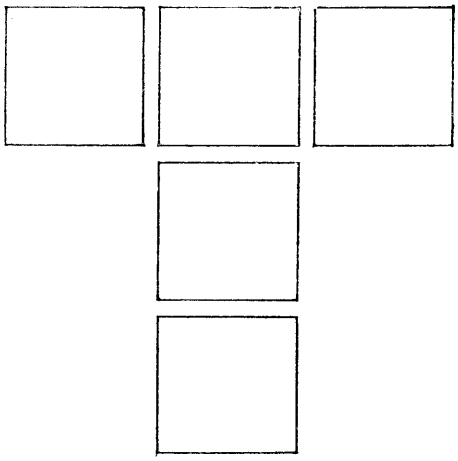
PRODUKTIVNOST U INDUSTRIJI

Publikacija neophodna svakom poslovnom čoveku

UDK: 621.892.893:621.9.014.2:621.9.015

MIROSLAV BABIĆ

Razvoj tribometra za istraživanje uticaja uslova obrade kontaktnih površina na vek trajanja elemenata tribo-mehaničkih sistema



Vek trajanja elemenata tribo-mehaničkih sistema u određenim uslovima eksploatacije, u osnovi, je uslovljen fizičko-mehaničkim svojstvima materijala u površinskim slojevima (mikrostruktura, veličina, znak i način raspodele zaostalih naprezanja, mikrotvrdoća i sl.) koji primaju kontaktna opterećenja, makrogeometrijom (neuravnjenost, ovalnost i sl.) i mikrogeometrijom kontaktnih površina (valovitost i hrapavost).

Ove karakteristike se formiraju u tehnološkom procesu, uz postojanje prenošenja svojstava iz predhodnih na završne operacije (pojava tehnološkog nasleđa).

Upravljanje tehnološkim procesom sa aspekta povećanja veka trajanja i pouzdanosti elemenata tribo-mehaničkih sistema pretpostavlja poznavanje zavisnosti između načina i uslova formiranja kontaktnih površina i njihovog ponašanja u uslovima trenja i habanja.

U okviru Laboratorije za obradu metala rezanjem i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, pored uređaja za tribometrijska ispitivanja elemenata mašina alatki, razvijen je tribometar za istraživanje uticaja uslova i režima ravnog brušenja kontaktnih površina na njihove triboloske karakteristike.

Rad sadrži opšti prikaz tribometrijskih uređaja kao sistema sa definisanom strukturom, geometrijom, ulaznim i izlaznim parametrima i osnovne karakteristike razvijenog tribometra.

1. OSNOVNA KLASIFIKACIJA TRIBOMETARA

Tribometrija obuhvata eksperimentalna istraživanja u oblasti tribologije i zasnovana je na razvoju istraživačkih uređaja, instrumenata i metoda za merenje parametara tribo-mehaničkih sistema.

Evolucija tribometrije, od jednostavnih uređaja za merenje sile trenja do velikog broja savremenih standardnih i specijalnih uređaja najrazličitijih mogućnosti, pratila je razvoj merne tehnike i metoda merenja.

Savremena fundamentalna istraživanja podrazumevaju utvrđivanje veličine parametara habanja kontaktnih slojeva elemenata tribo-mehaničkih sistema, poniranje u strukturu površinskih slojeva, kvantificiranje prenosa masa unutar sistema i sl

Klasikifacija veoma raznovrsne merne tehnike u ovoj oblasti može se izvršiti s obzirom na zastupljeni pristup izučavanju tribo-mehaničkih sistema.

Pristup sistemu sa aspekta njegove strukture (elementi sistema, njihove osobine i međusobna interakcija) podrazumeva razvoj i konstrukciju:

— tribometara za ispitivanje elemenata tribo-mehaničkih sistema i njihovih karakteristika, i
— tribometara za praćenje odvijanja triboloških procesa u kontaktnim slojevima elemenata sistema.

Tribološka ispitivanja sa aspekta funkcionisanja tribo-mehaničkih sistema obavljaju se na:

— tribometrima za modelska ispitivanja, i
— tribometrima za praćenje triboloških procesa na kontaktnim površinama elemenata stvarnih tribo-mehaničkih sistema.

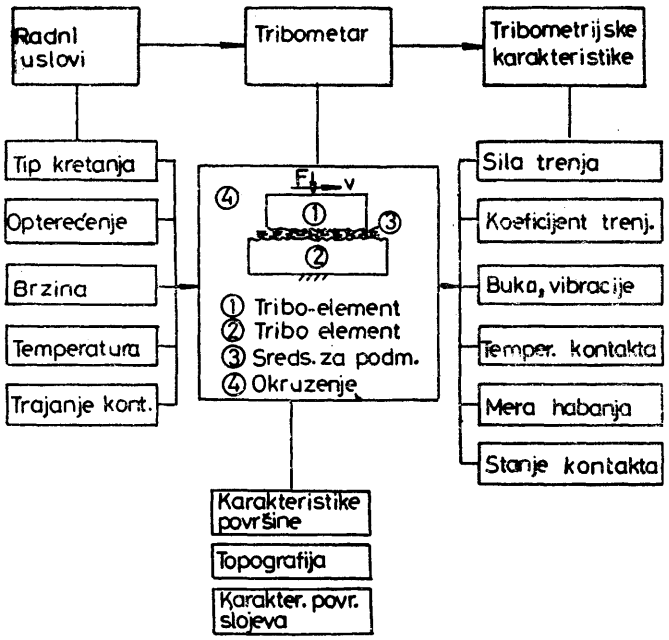
Najveći deo eksperimentalnih istraživanja u oblasti tribologije odnosi se na probleme trenja i habanja i obavljaju se na laboratorijskim tribometrijskim uređajima (tribometrima).

Pregled publikovanih rezultata ispitivanja iz oblasti trenja i habanja u poslednjih trinaest godina pokazuje da se približno 50% izveštaja istraživanja odnosi na laboratorijska merenja, a samo 17% na stvarne tribo-mehaničke sisteme [2].

Primena tribometara, uglavnom, je vezana za izučavanje strukture sistema — na primer, promena u osobinama komponenti sistema u toku odvijanja procesa trenja i habanja. Postojanje, često znatnih, razlika u uslovima pod kojima se ostvaruje kontakt na tribometru i realnom tribo-mehaničkom sistemu nalaže posebnu pažnju u interpretaciji i primeni dobijenih rezultata. Nekritička generalizacija rezultata može do znatnog krivljenja slike stvarnih procesa.

1.1. Osnovni parametri tribometra

Principijelna šema tribometra kao sistema sa ulaznim i izlaznim parametrima data je na sl. 1.



Sl. 1. Parametri tribometra [2]

Prikazani ulazni parametri (tip kretanja, opterećenje, brzina relativnog kretanja, temperatura okruženja, vreme trajanja kontakta, karakteristike topografije površina) definišu uslove pod kojima se odvija kontakt elemenata tribometra (1) i (2), dok izlazni parametri (veličina sile trenja, koeficijent trenja, buka, vibracije, temperatura kontakta, intenzitet habanja, otpornost na habanje, promena topografije površina u kontaktu) definišu odvijanje procesa trenja i habanja.

Jedna od osnovnih karakteristika svakog tribometra je geometrija kontakta elemenata (1) i (2). U opštem slučaju dodir se u početku ostvarivanja kontakta, zavisno od geometrijskih oblika tela i načina njihovog uparivanja, može ostvariti u tački, po liniji i po određenoj površini.

U okviru publikacije »Friction And Wear Devices« Društva američkih inženjera za podmazivanje (ASLE) dat je prikaz 234 tribometra različitih po geometriji kontakta, vrsti trenja, načinu kretanja, relativnoj brzini, opterećenju kontakta, temperaturi okruženja, okruženju, stanju površina u kontaktu i vrsti sredstava za podmazivanje. Sa aspekta osnovne geometrije kontakta svi obuhvaćeni tribometri su svrstani u dvanaest grupa. Ta podela sa primerima data je u tabeli 1.

Pored geometrije, savremena tribometrijska ispitivanja pretpostavljaju potpunu definisanost strukture tribo-mehaničkog sistema sadržanog u tribometru. Pod strukturom se podrazumeva ceo komlpeks karakteristika materijala elemenata u kontaktu (1) i (2) (oznaka materijala, hemijski sastav, tvrdoća, modul elastičnosti, jačina na kidanje i sl.), njihovih površinskih slojeva (mikrostruktura, zaostala naprezanja, mikrotvrdoća i sl.) i površina (valovitost, hrapavost, mikropukotine, pregorela mesta i sl.), sredstva za podmazivanje (oznaka, sastav, viskozitet i sl.) i okruženja (atmosfera, vakum i sl.).

Sa aspekta načina odvijanja procesa trenja i habanja veoma su važne karakteristike koje se odnose na uzajamno delovanje elemenata sistema:

— početna površina kontakta i promena površine kontakta u toku procesa trenja i habanja;

— početni kontaktni pritisak i njegova promena u toku procesa habanja elemenata;

— odnos kontaktne površine i površine traga trenja (habanja);

— odnos površina i zapremina elemenata između kojih se ostvaruje kontakt.

Osnovni cilj ispitivanja u oblasti tribometrije sastoji se u definisanju zavisnosti između izlaznih parametara trenja i habanja, relevantnih karakteristika strukture sistema i radnih uslova. Univerzalne zavisnosti je veoma teško dobiti zbog velike složenosti procesa i velikog broja uticajnih parametara. Praktični ciljevi su obično uži

Pored tribometara koji daju samo uporedne rezultate uticaja strukturnih karakteristika tribo-mehaničkih sistetema (vrsta materijala elemenata, vrsta nanesenih prevlaka, način dobijanja površina elemenata, vrsta sredstava za

TABELA 1.

VRSTA KONTAKTA	PRIMER
1. Kontakt više sfera	
2. Kontakt ukrštenih cilindara	
3. Kontakt malog cilindra (ili sfere) i ravne ploče -pokretni cilindar (sfera) -pokretna ploča -višestruki kontakt	
4. Kontakt ravnih ploča	
5. Kontakt rotirajućih malih cilindara i diska	
6. Kontakt cilindra (ili sfere) i rotirajućeg diska	
7. Kontakt cilindara po čeonim površinama	
8. Kontakt čeone površine cilindra (ili sfere) i omotača cilindra	
9. Kontakt pravougane ploče i rotirajućeg cilindra	
10. Kontakt dva diska	
11. Kontakt preko više elemenata	
12. Kontakt se ostvaruje na raznovrsne načine	

TABELA 2.

Struktura tribometra				
Karakteristike elemenata	Tribo-element (1)	Tribo-element (2)	Sredstvo za podmaziv (3)	Okruženje (4)
oznaka materijala				
geometrija, dimenzije, zapremina				
hemijski sastav				
fizicko-mehanicke karakteristike: -tvrdoca, -viskozitet, -ostale				
opis topografije			ostali podaci:	
karakteristike površinskog sloja				
površina kontakt.		tribološka interakcija:		
$\varepsilon = \frac{\text{površ. kontakta}}{\text{površ. traga hab.}}$		(1) (2) (3) (4)		
način podmazivanja				

podmazivanje i sl.), ili ulaznih parametara (uslova kontakta) na proces trenja i habanja, postoji veliki broj tribometara koji simuliraju tribološke procese na realnim tribo-mehaničkim sistemima.

Pri takvom pristupu na tribolemtrijskim uređajima modelira se tribološko ponašanje realnih tribo-mehaničkih sistema u celini, ili, češće, ponašanje nekih njegovih vitalnih elemenata.

U početnoj fazi istraživanja neophodno je raspolagati informacijama vezanim za realni sistem, na osnovu kojih se postavlja zahtev tribometrijskom uređaju za ostvarivanjem sličnosti u pogledu:

— radnih uslova (tip kretanja elemenata u kontaktu, opterećenje kontakta, brzina relativnog kretanja, temperatura okruženja, trajanje kontakta i sl.);

— strukture sistema (karakteristike materijala elemenata u kontaktu, karakteristike sredstava za podmazivanje i okoline i sl.);

— triboloških karakteristika (izgled pohabanih površina, temperatura kontakta, koeficijent trenja, otpornost na habanje, vibracije i sl.).

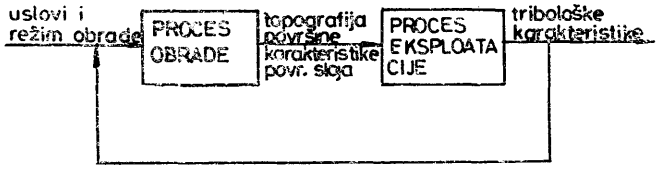
Očigledno je da ovakvo ostvarivanje sličnosti velikog broja uticajnih parametara i složenih procesa u zoni kontakta predstavlja težak zadatak u tribometrijskim istraživanjima, koji se može rešavati samo uz određeni broj dozvoljenih (za dati slučaj) uprošćenja.

2. KARAKTERISTIKE TRIBOMETRA ZA ISTRAŽIVANJE UTICAJA USLOVA OBRADE KONTAKTNIH POVRŠINA NA VEK TRAJANJA ELEMENATA TRIBO-MEHANIČKIH SISTEMA

Površinski slojevi elemenata tribo-mehaničkih sistema formiraju se kao rezultat tehnoloških operacija, pri čemu se, pored geometrijskih karakteristika (oblik, valovitost, hrapavost, uspostavlja određeno fizičko-mehaničko stanje površinskih slojeva — različito u odnosu na osnovni materijal.

S obzirom da je većina otkaza tribo-mehaničkih sistema vezana za procese trenja i habanja, koji se odvijaju u površinskim slojevima elemenata u kontaktu, veoma je važno ustanoviti vezu između načina i uslova njihove obrade i triboloških karakteristika u procesu ostvarivanja kontakta.

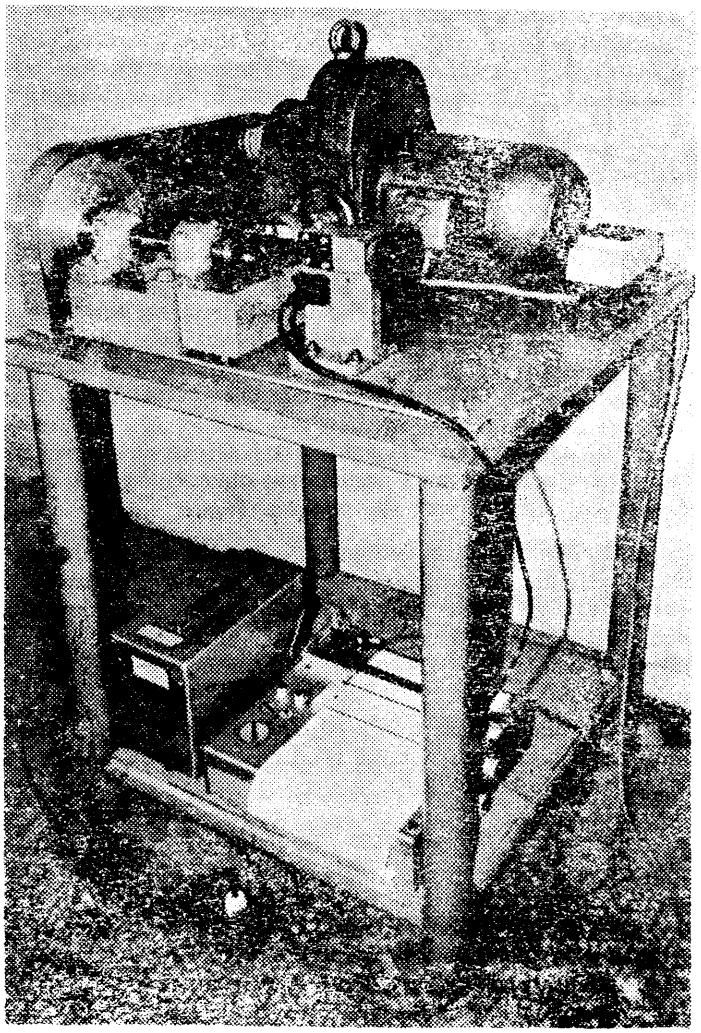
U cilju rešavanja na ovakav način generalno definisanog zadatka, koji se uslovno može iskazati šemom regulacionog kola sa povratnom spregom (Sl. 2), u Laboratoriji za obradu metala rezanjem i tribologiju Mašinskog fa-



Sl. 2. Upravljanje tehnološkim procesom s obzirom na tribološke karakteristike kontaktnih slojeva

kulteta u Kragujevcu razvijen je tribometar prikazan na slici 3.

Konstrukcija tribometra, sa geometrijskog aspekta, zasniva se na šemi kontakta ekscentrično postavljenog paralelopipeda i diska. Nepokretni uzorak u obliku paralelopipeda naleže površinom čije se tribološke karakteristike ispituju (površina je dobijena u određenim uslovima obrade) na kontratelo u obliku diska koji rotira.



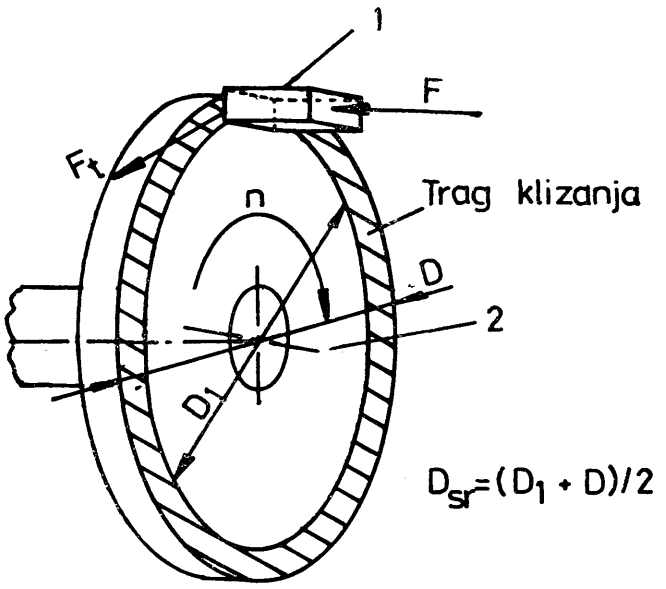
Sl. 3. Fotografija tribometra

U koncepciji uređaja udovoljeno je zahtevu za postojanjem širokog raspona variranih uslova ostvarivanja kon-

takta (brzina relativnog kretanja, opterećenje i trajanje procesa trenja i habanja).

Obrtno kretanje diska obezbeđuje elektromotor sa frikcionim varijatorom brzina, snage 1,5 kW. Izlazni brojevi obrtaja sa mogućim rasponom 367—1762 o/min, posredstvom jednostrukog kaišnog prenosa, redukuju se na broj obrtaja diska u rasponu 110—530 o/min.

Brzina relativnog kretanja elemenata u kontaktu određena je brojem obrtaja i veličinom srednjeg prečnika prstena po kojem se odvija trenje klizanja (Dsr). Zahvaljujući ostvarljivom rasponu brojeva obrtaja, sa mogućnošću kontinualne promene, i mogućim prečnicima Dsr = 40—150 mm, obezbeđuju se brzine u dajapazonu 13—80 m/min



Sl. 4. Osnovna geometrija tribometra

Pritisak između elemenata (1) i (2) ostvaruje se pomoću navojnog vretena i prstenastog dinamometra sa mernim trakama za merenje sile pritiska (F).

U cilju očuvanja konfiguracije ispitivane površine elementa (1), kao nosioca »informacija« o uslovima izvršene obrade, ulje za podmazivanje se ne dovodi u zonu kontakta pod pritiskom. Periferni delovi diska, po kojima se odvija klizanje, iznose ulje iz rezervoara i obezbeđuju konstantne uslove podmazivanja.

Do veličine puta trenja (1) dolazi se posrednim putem na osnovu poznavanja brzine relativnog kretanja (v) i vremena trajanja kontakta (t),

$$1 = vt = (Dsr\pi n)/1000 \ . \ [m/min] \qquad (1)$$

Tribometar, uz korišćenje odgovarajuće instrumentacije, pruža mogućnost za određivanje sile trenja, koeficijenta trenja, temperature kontakta, promene mikrogeometrije kontaktnih površina i debljine pohabanog sloja

Dinamometar realizovan pomoću mernih traka na konzolnom nosaču elementa (1) meri veličinu sile trenja i ona se na pisaču registruje neprekidno u toku ispitivanja. Na osnovu rezultata merenja normalne sile pritiska (F) i tangencijalne sile trenja (Ft) može se utvrditi veličina i način promene koeficijenta trenja (μ), kao osnovni pokazatelji koji kvantificiraju odvijanje procesa trenja elemenata u kontaktu.

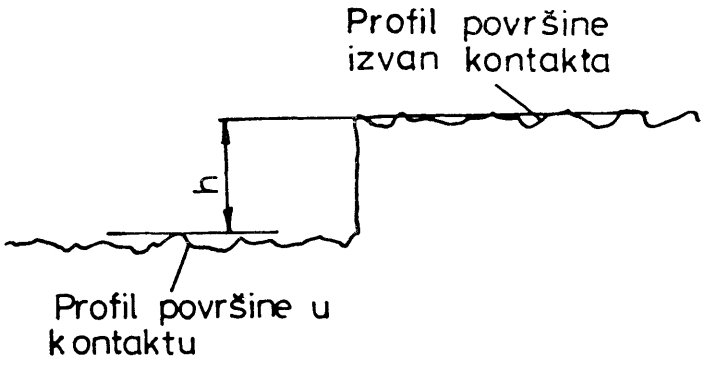
Sagledavanje procesa trenja sa aspekta toplote generisane u zoni kontakta omogućuje ugradnja termopara (veštačkog ili poluprirodnog) u nepokretni element (1) na određenoj dubini od ispitivane površine.

Elementi tribometra ostvaruju kontakt preko površina određenih topografskih karakteristika, koje u velikoj meri determinišu procese trenja i habanja u toku ispitivanja.

U početnoj fazi ispitivanja — fazi uhodavanja — kontakt je lokalizovan na vrhove mikroneravnina, zbog čega realna površina kontakta predstavlja veoma mali procenat nominalne površine kontakta. U takvim uslovima na mestima stvarnog kontakta nastaju velika specifična mehanička i toplotna opterećenja koja izazivaju plastično deformisanje i smicanje mikroneravnina. Ove pojave dovode do intenzivnog inicijalnog habanja.

U periodu uhodavanja u lakim i srednjim uslovima kontakta visina neravnina se smanjuje za 65% do 75%, pri istovremenom povećanju stvarne površine dodira i smanjenju specifičnih opterećenja. Promena oblika i dimenzija neravnina odvija se do postizanja nekog »optimalnog stanja« koje zavisi od uslova trenja i habanja. Za površine sa istim vrednostima visinskih parametara hrapavosti (Ra, Rz, Rmax) i različitom strukturom neravnina ponašaju se različito u istovetnim uslovima kontakta. Iz toga razloga potpuna definisanost mikrogeometrije površina s tribološkog aspekta podrazumeva poznavanje rasporeda materijala po dubini mikroneravnina (krive nošenja profila) i oblika neravnina (radijusi zaobljenja neravnina, ugao nagiba neravnina).

Veličina inicijalnog habanja određuje se metodom profilografisanja i predstavlja razliku visina mikroneravnina merenu na istom mestu u različitim momentima ispitivanja. Na profilogramima konture istih udubljenja ostaju nepromenjene, dok izbočine, usled habanja, menjaju svoju visinu. Primena ove metode omogućava dobijanje grafičkog zapisa reljefa pohabane površine, što služi za ocenu raspodele pohabanosti po površini kontakta. Ukoliko veličina pohabanosti prevazilazi visinu neravnina, onda se kao baza od koje se meri debljina pohabanog sloja koristi deo površine elementa (1) koji nije u kontaktu.



Sl. 5. Šema određivanja debljine pohabanog sloja metodom profilografisanja

Za merenje debljine pohabanog sloja može se koristiti i metod veštačkih baza, koji se sastoji u izračunavanju rastojanja površine trenja do dna veštačkim putem oform-

ljenog udubljenja pravilnog geomritjskog oblika. Veštačke baze se mogu utiskivati, bušiti i brusiti. Na primer, otisak nanesen na površinu pomoću pribora za merenje tvrdoće po Vikersu omogućava lako merenje veoma malih dubina habanja na osnovu promene veličine dijagonala otiska.

Postojanje instrumentacije za merenje radioaktivnosti u Laboratoriji za obradu metala rezanjem i tribologiju upućuje na metod ozračivanja tankog površinskog sloja materijala i praćenja pada radioktivnosti u toku ispitivanja kao metodu koja daje znatno objektivnije rezultate procesa habanja.

ZAKLJUČCI

— Uspešno rešavanje problema povećanja veka trajanja elemenata tribo-mehaničkih sistema moguće je samo na osnovu kompleksnih istraživanja zavisnosti vrste i uslova formiranja kontaktnih površina, njihovih geometrijskih i fizičko-mehaničkih karakteristika i parametara odvijanja triboloških procesa u različitim uslovima trenja i habanja.

— U Laboratoriji za obradu metala rezanjem i tribologiju razvijen je tribometar jednostavne konstrukcije na kome se uspešno mogu simulirati različiti uslovi trenja klizanja u pogledu opterećenja kontakta, brzine relativnog kretanja i trajanja kontakta,

— Korišćenje tribometra uz odgovarajuće merne uređaje pruža mogućnost praćenja sile trenja, koeficijenta trenja, temperature kontakta, mikrogeometrije površina i debljine pohabanog sloja, kao parametre koji u potpunosti definišu odvijanje triboloških procesa.

LITERATURA

1. B. IVKOVIĆ, Osnovi tribologije u industriji prerade metala, materijal za štampu
2. H. CZICHOS, Tribology a sistems approach to the Science and tehnology of friction, lubrication and wear, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam and New York, 1978.
3. Kolektiv autora, Friction And Wear Devices, Second Edition, ASLE, 1976.
4. D. S. JAS, V. B. PODMOKOV, N. S. DJADENKO, Ispitivanja na trenije i iznos, metodi i oborudovanije, Tehnika, Kijev, 1971.
5. P. I. JAŠĆERICIN, E. V. RIŽOV, V. I. AVERČENKOV, Tehnologičeskaja nasledstvennost v mašinostrojeniji, Nauka i tehnika, Minsk, 1977.
6. M. HEBDA, A. WACHAL, Trybologia, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1980.

IZAŠLA JE
IZ ŠTAMPE KNJIGA

OSNOVI TRIBOLOGIJE

Prof. dr Branko Ivković

IZDAVAČ
GRAĐEVINSKA KNJIGA
BEOGRAD

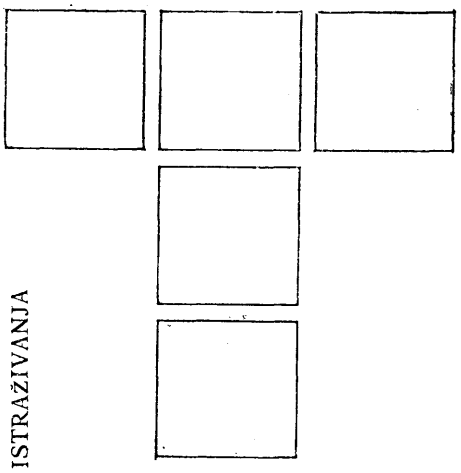
OSNOVNA POGLAVLJA:

- **priroda i topografija kontaktnih površina**
- **osnovne teorije trenja**
- **osnovne teorije habanja**
- **podmazivanje u tribomehaničkim sistemima**
- **osnovi tribometrije**
- **identifikacije osnovnih tribo-mehaničkih sistema u industriji prerade metala**
- **maziva u tribo-mehaničkim sistemima**
- **postupci povećanja otpornosti na habanje kontaktnih slojeva elemenata tribo-mehaničkih sistema**
- **sistemski prilaz rešavanju triboloških problema u industriji prerade metala**

Cena 230 din.

Porudžbine slati na izdavača:

GRAĐEVINSKA KNJIGA
B E O G R A D



ISTRAŽIVANJA

UDK: 621.833.002.2:621.833.001.4

О. В. БЕРЕСТНЕВ

Konstruisanje, proračun i ispitivanje samo-podešljivih zupčanika

S ruskog preveo: **dr Miodrag Lazić**

U savremenim uslovima i daljoj perspektiv zupčanci neće imati odgovarajuću zamenu pri izgradnji prenosnih mehanizama velikog broja savremenih mašina. Broj proizvedenih zupčanika, samo srednjih i većih modula, u SSSR-u prelazi 350 miliona komada godišnje, uz neprekidan porast. Iako imaju niz prednosti u pogledu gabarita, koeficijenta iskorišćenja, jednostavnosti eksploatacije i slično, zupčasti prenosnici, istovremeno, u mnogim slučajevima, ograničavaju pokazatelje pouzdanosti rada i veka trajanja mašina i dovode do povećanja nivoa vibracija i šuma.

Jedan od najefikasnijih puteva kompleksnog rešavanja problematike povećanja noseće sposobnosti i veka trajanja prenosnika, uz istovremeno sniženje nivoa vibracija, je izgradnja i korišćenje samo-podešljivih zupčanika sa elastičnim vezivanjem i povećanim stepenom prilagodljivosti zupčastog venca. Poznat je niz konstrukcionih rešenja zupčanika tog tipa, a takođe i pojedini primeri njihove uspešne primene u proizvodnim uslovima kako u inostranstvu tako i u zemlji. Međutim, do skora je ispitivanje takvih konstrukcija izvođeno prvenstveno u laboratorijskim uslovima, što je, u značajnoj meri, usporilo razvoj ovog perspektivnog rešenja zupčastih prenosnika. U savremenim uslovima ovaj problem se znatno brže rešava i ide ubrzanim tempom. To se, posebno, može sagledati kroz radove Л. Н. Решетова [1], В. К. Гринкевича, В. И. Порядкова [2], saradnika Instituta za pouzdanost i vek trajanja mašina AN BSSR (INDMAŠ) [3]. Rezultati ispitivanja В. А. Белого, А. И. Свириденка, В. Е. Старжинского, С. В. Щербакова ukazuju na sve veći značaj primene zupčanika izrađenih na bazi polimera ili odgovarajuće kompozicije metala i polimera [8].

Prikazana, kratka, analiza ukazuje na aktuelnost razrade teorijskih osnova i metoda konstruisanja i proračuna, izgradnje i ispitivanja novih konstrukcija samo-podešljivih zupčanika sa elastičnim vezivanjem i povećanim stepenom prilagođavanja zupčastog venca, a takođe i prenosnika na njihovoj osnovi, razradu i eksperimentalne preporuke za formiranje perspektivnih tehnoloških postupaka njihove izrade i aplikacije u proizvodnji.

U toku rešavanja problema značajno je poznavanje i analiza osnovnih faktora, što je osnovna pretpostavka stvaranja uslova za povećanje veka trajanja i sniženje nivoa vibracija zupčastih prenosnika, pri primeni zupčanika razmatranog tipa.

To su, pre svega, sledeći faktori: otklanjanje defektnih veza kod zupčastih sklopova, povećanje ravnomernosti raspodele opterećenja duž kontaktnih linija, sniženje dinamičkih komponenti, izolacija vibracija i amortizacija visoko-frekventnih intenzivnih oscilacija, stvorenih i predatih zupčastom sprezanju. Konstrukcija višedelnih zupčanika stvara veoma pogodne uslove za unifikaciju elemenata, organizaciju njihove odvojene proizvodnje, primenu visoko-produktivnih metoda njihove obrade, racionalniju potrošnju materijala, kroz primenu jeftinijih materijala za izradu glavčine, povećanje stepena remontnog opsluživanja zupčanika. Analiza pomenutih faktora, dostizanje njihove optimalne vrednosti i formiranje odgovarajućeg kriterijuma stepena uticaja pojedinih faktora su osnova za razradu metodologije racionalnog konstruisanja pomenutih tipova zupčanika.

Za olakšanje problematike izgradnje sistema konstruisanja i proračuna, kao i definisanje najperspektivnijih rešenja u konkretnim uslovima, izvedena je odgovarajuća klasifikacija zupčanika razmatranog tipa, kako na bazi konstrukcije tako i na bazi tehnologije njihove izrade (tablica 1). Pri tome treba posebno uočiti višedelne zupčanike sa elastičnim vezama i povećanim stepenom prilagođavanja zupčastog venca, zupčanike koji se primenjuju, za sve tipove zupčastih prenosnika i imaju najveće mogućnosti za povećanje noseće sposobnosti i veka trajanja, kao i sniženje nivoa vibracija prenosnika. Istovremeno treba naglasiti da su moguće i često najefikasnije konstrukcije zupčanika bazirane na karakterističnim prednostima nekoliko grupa (videti tablicu 1).

SHP — SEPARATOR

OTKLANJA HIDRAULIČNA I DRUGA ULJA IZ SREDSTAVA ZA HLAĐENJE I PODMAZIVANJE

SEPARATOR JE RAZVIJEN U CENTRU ZA PRODUKTIVNOST RADA MAŠINSKOG FAKULTETA U KRAGUJEVCU

Tablica 1: Klasifikacija samo-podešljivih zupčanika sa elastičnim vezivanjem i povećanim stepenom prilagođavanja zupčastog venca

	Grupe na bazi konstruktivnih karakteristika	Ocena mogućnosti konstrukcije: povećanje noseće sposobnosti	sniženje vibracija	sniženje teškoća u izradi	sniženje potrošnje materijala	povećanje stepena remonta	Preporučene oblasti primene
I	Zupčanici sa povećanim prilagođavanjem zuba, glavčine i oboda	S	S	N	N	N	Visokobrzinski energetski i kinematski prenosnici
II	Zupčanici sa umetnutim i ugrađenim amortizerima	M	S	N	N	N	Prenosnici mašina sa povećanim zahtevima u pogledu nivoa vibracija
IIIa	Višedelni zupčanici sa elastičnim vezama i — Preko čeličnih elastičnih elem.	O	B	M	B	B	Energetski prenosnici sa oštrim režimima eksploatacije
IIIb	prilagodljivim vencem — preko sloja elast. mater.	M	O	M	B	B	Energetski prenosnici za, prvenstveno, niže režime rada
IV	Zupčanici sa središnim elastičnim elementima u sprezanju	S	S	N	M	O	Energetski prenosnici velikih dimenzija sa visokim zahtevima u pogledu remonta
V	Zupčanici građeni na bazi odgovarajuće kompozicije metala i polimera	N	O	O	B	M	Energetski i kinematski prenosnici pri nižim režimima rada

O — odlična, B — vrlo dobra, C — dobra, M — zadovoija vajuća, N — slaba

Uopšten prikaz redosleda konstruisanja i proračuna samo-podešljivih zupčanika obuhvata:

1. — Sagledavanje celishodnosti primene, koja se, često, javlja kao direktan zaključak adekvatno definisanog eksploatacionog zadatka vezanog za neophodnost značajnog povećanja veka trajanja i sniženja nivoa vibracija prenosnika, uz potrebno poboljšanje njihovih karakteristika, poboljšanje, koje se ne može obezbediti na drugi način.

Sa pozicije teorije mašina i mehanizama celishodno je uočiti neophodnost otklanjanja suvišnih veza pri sprezanju zupčanika, na koje je prvi obratio pažnju Л. Н. Решетов [1]. Evidentno je da, pri razmatranju zupčastih prenosnika kao prostornih mehanizama, svako zupčasto sprezanje sa linijskim kontaktom formira jednu suvišnu vezu i dovodi do velike neravnomernosti raspodele opterećenja duž kontaktne linije. Kod, pak, zupčanika razmatranog tipa ova veza se, pod opterećenjem, menja i dovodi do sniženja vrednosti koeficijenta neravnomernosti $K\beta$. U projektnoj fazi koeficijent $K\beta$ pri sprezanju višedelnih zupčanika može biti određen po približnim formulama А. Н. Петрусевича [4].

Sniženje dinamičkih komponenti opterećenja, može se takođe uzeti u obzir primenom približne formule Е. Бакингэма i А. И. Петрусевича:

$$\nu = \psi V_o \sqrt{\mu c}, \quad (1)$$

gde su:

μ — ekvivalentna masa spregnutih zupčanika,
c — krutost njihovog sprezanja,
V_o — brzina udara i
ψ — koeficijent sniženja.

Dalje, primenom poznate metodologije proračuna čvrstoće zupčastih prenosnika, moguće je, orjentaciono, odrediti potrebno, za tehno-ekonomske proračune, povećanje noseće sposobnosti i veka trajanja prenosnika (očekivano povećanje). Tehno-ekonomski proračun efektivnosti treba, takođe, uzeti u obzir ekonomiju deficitarnih materijala, povećanje ili sniženje teškoća u izradi, povećanje mogućnosti adekvatnog remonta prenosnika.

2. — Izbor konstrukcije izvodi se na bazi konkretnih osobenosti projektovanog prenosnika, prema predloženoj klasifikaciji, iz albuma poznatih konstrukcija prenosnika ili se formira novo konstruktivno rešenje za projektovani prenosnik i uslove njegove eksploatcaije, uzimajući, takođe, u obzir i nivo tehnologije proizvođača, eksploatacionih i remontnih službi.

3. — Parametre zupčastog sprezanja, na stadijumu razrade konstrukcije zupčanika ispitivanog tipa, treba odrediti u skladu sa opštepriznatim preporukama i metodologijama proračuna zupčanika istih dimenzija (jednodelnih zupčanika). Zatim, iz uslova jednake čvrstoće i dostignutog povećanja noseće sposobnosti i veka trajanja prenosnika, modul i širina zupčastog venca mogu biti smanjeni.

Za zupčanike sa povećanim prilagođavanjem zuba i zupčastog venca neophodno je izvesti proveru ograničenja u pogledu čvrstoće. Opštepoznata metodologija ne dozvoljava, u savremenim uslovima, izvođenje proračuna savojne čvrstoće zuba sa nestandardnim profilima, uz odgovarajuću, neophodnu, tačnost proračuna. U tom cilju koristi se metod konačnih elemnata, prema programu Instituta za proučavanje čvrstoće AN USSR, i metod graničnih integralnih

jednačina, izgrađen zajedno sa saradnicima naučnog centra Fabrike traktora u Minsku. Upoređenja slika računskih naprezanja dobijenih eksperimentalnim polarizaciono-optičkim metodama na modelima, pokazuju da se računsko dobijeni podaci dobro slažu sa eksperimentalnim.

4. — Najodgovornija etapa, pri projektovanju zupčanika, predstavlja izbor racionalnih parametara elemenata za elastično vezivanje. Pri tome treba uzeti u ozbir, istovremeno, nekoliko uslova:

4.1. Uslovi čvrstoće su obavezni pri projektovanju svih grupa zupčanika. Minimalna vrednost parametara elastičnih veza proračunava se po poznatim i novo formiranim, dovoljno jednostavnim, približnim formulama. Završni proračun (korigovani i tačni proračun) zahteva rešavanje složenih statički neodređenih zadataka vezanih za proračun opterećenja pojedinih elastičnih elemenata.

4.2. Istovremeno sa tim zadatkom nameće se i zadatak izbora parametara elastičnih veza, iz uslova obezbeđenja samo-podešavanja spregnutih zuba i sniženja neravnomernosti raspodele opterećenja duž kontaktne linije. Za prenosnike sa zupčanicima ispitivanog tipa, formirane su formule, povećane tačnosti, za proračun koeficijenta $K\beta$ i potrebnog prilagođavanja $\alpha_{yc}\Sigma$ pri poznatoj vrednosti koeficijenta $[K\beta]$. Iste omogućuju sagledavanje uticaja kako smanjenja, tako i povećanja stepena neravnomernosti faktora:

$$K\beta = \frac{(\gamma_0/P + \sum_{i=1}^{n} \alpha_{ip})\ 6 \cdot b^2_w C + b^2_w C \sum_{i=1}^{n} \alpha_{im} + 12}{b^3_w\ C \sum_{i=1}^{n} \alpha_{im} + 12}. \quad (2)$$

U izrazu su:

γ_0 — ugao nagiba između zuba u kontaktu, uslovljen »spoljašnjim«, u odnosu na sprezanje razmatranog prenosnika, izvorom (greške izrade, greške montaže i slično),

P — obim sila,

α_{ip} i α_{iM} — koeficijenti prilagodljivosti i-tog od n-elementa u pravcu obimne sile i izmenjenog momenta u sprezanju i

c — specifična krutost zuba.

Posebno značajan interes predstavlja određivanje parametara prilagođavanja oboda (venca) na elastičnim lokalnim osloncima u zavisnosti od izmenjenog momenta. Rešenje je dovelo do računskih programa na ECVM (računaru) i odgovarajućih primera proračuna [5].

4.3. Proračun parametara iz uslova sniženja dinamičkog opterećenja i nivoa vibracija zupčanika i elemenata prenosnika, primenom metoda povećane tačnosti, uz dopunsku analizu uticaja parametara krutosti elastične veze i razdvajanje mase zupčanika na masu venca i glavčine. U toku razrade metodologije analitički je dokazano da razdvajanje mase zupčanika na dve komponente, uz njihovo elastično vezivanje, uvek snižava veličinu mogućeg maksimalnog dinamičkog naprezanja ν_c u zupčastom sprezanju. Na taj način su formirane konačne računske formule, formule koje mogu biti iskorišćene za izbor racionalnih parametara elastičnih veza:

$$c = C V_0 \left[\frac{\omega_{02}^2 - c/\mu}{\omega_{01}(\omega_{02}^2 - \omega_{01}^2)} + \frac{\omega_{01}^2 - c/\mu}{\omega_{02}(\omega_{01}^2 - \omega_{01}^2)}\right];$$

$$\omega_{0(1,2)} = \frac{1}{2}\left[\frac{C_{yc}}{\mu_0} + \frac{C}{\mu} \pm \right.$$

$$\left. \pm \sqrt{\left(\frac{C_{yc}}{\mu_0} + \frac{C}{\mu}\right)^2 - 4C\ C_{yc}\left(\frac{1}{\mu_0\mu} + \frac{1}{\mu_2^2}\right)}\right]. \quad (3)$$

U izrazu je:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2};\ \frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_3}, \quad (4)$$

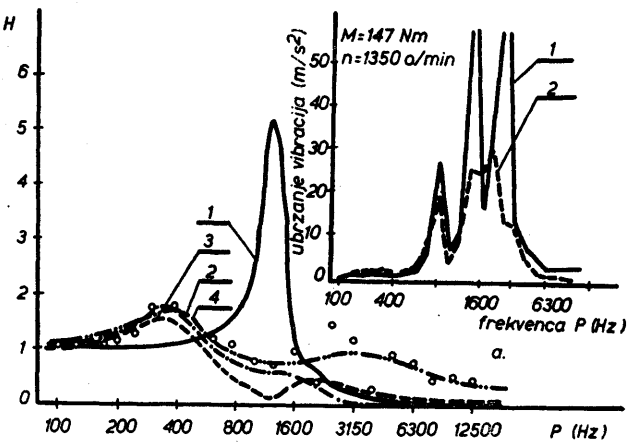
dok su:

μ_1, μ_2, μ_3 — ekvivalentne, u odnosu na podeoni prečnik, mase zupčanika, oboda i glavčine,

C i C_{yc} — krutost zupčastog sprezanja i elastične veze u pravcu dodirnice.

Pogodan kriterijum za ocenu sniženja nivoa vibracija prenosnika i izbor racionalnih vrednosti parametara njegovih elemenata je upoređenje prenosnih funkcija dinamičkih modela lokalnih delova i prenosnika u celini, prenosnih funkcija koje najpotpunije karakterišu dinamičke osobine sisstema.

Za proračun prenosnih funkcija uprošćenih modela sa 2 ili 3 mase, modela pojedinih elemenata prenosnika, koristi se metod kompleksnih otpora. Po tom modelu dinamički model predstavlja mehanički lanac pasivnih i aktivnih elemenata sa kompleksnim otporima. Za jednostavnije sisteme mogu se dobiti analitičke računske formule, dok je primer rezultata proračuna, dobijen na računaru primenom automata za crtanje »Itekan«, prikazan na slici 1.



Sl. 1. — Grafički prikaz prenosne funkcije H(p) dinamičkog modela zupčastog para prenosnika alatnih mašina:
1 — serijski jednodelni zupčanici
2 — opitni višedelni zupčanici
3 — odnos H_2/H_1
4 — odnos H_2/H_1 na bazi eksperimentalnih podataka
Sl. 1a — ubrzanje vibracija (1, 2, 3 — krive formirane automatskim uređajem za crtanje Itekan-2M)

Često je, u dinamičkom sistemu, skoro nemoguće odvojiti jednostavne lokalne delove, što dovodi do nedovoljnog broja neophodnih podataka o disperziji karakteristika, to jest koeficijentima amortizacije njegovih elemenata i sklopova, podataka neophodnih u fazi projektovanja. Za ispitivanje takvih sistema i izbor racionalnih elastično-inercionih parametara formiran je novi kriterijum ocene i upoređivanja kvaliteta dinamičkih sistema zupčastih prenosnika preko sopstvenih oblika oscilovanja njegovih elemenata na sopstvenim frekvencama. Prilaz je zasnovan na činjenici da odnos amplituda oscilovanja elemenata realnih dinamičkih sistema na rezonantnim frekvencama u potpunosti odgovara sopstvenom obliku na tim frekvencama. Na mogućnost korišćenja ovakvog prilaza, najpre, je ukazano u radovima В. К. Гринкевича. Ovaj prilaz je doveden do radne metodologije [6]. U formulu kriterijuma kvaliteta H_k naknadno je uveden koeficijent sniženja dinamičkih komponenti opterećenja ν_o/ν u zupčastom sprezanju, koeficijenta određenog po formuli 3, i težinski koeficijent K_j, K_i bliski sopstvenim frekvencama ω_j, ω_i kod najkritičnijih zuba P_z i pri deljivim frekvencama u oblasti radnog dijapazona frekvenci G. Analiza obuhvata udarni impuls pravougaonog oblika i odnos amplituda njegovog harmonika prikazanog Furijevim redom. Na taj način kriterijum uključuje dva nezavisna koeficijenta i ukupnu normiranu amplitu-

du sopstvenih formi $q_k^{\sim(j)}$ i $q_k^{\sim(i)}$, na nekom izlaznom elementu, umnoženih kvadratom sopstvenih frekvenci:

$$H_k = \frac{v_c}{v} \cdot \frac{\sum_{\omega_j EG} K_j \left| q_k^{\sim(j)} \right| \omega^2_j}{\sum_{\omega_i EG} K_i \left| q_k^{\sim(i)} \right| \omega^2_i} . \qquad (5)$$

Uporedna ocena nivoa vibracija koničnih prenosnika traktora MTZ 80 sa jednodelnim i višedelnim zupčanicima, po navedenom kriterijumu, ukazuje na sniženje nivoa vibracija za 1,65 puta. Eksperimentalno dobijena vrednost je 1,5—2 puta. Kriterijum može biti iskorišćen i za ocenu kvaliteta dinamičkih modela drugih mehaničkih sistema redosledne i slične strukture.

Veće mogućnosti za ispitivanje uticaja parametara elemenata višedelnih zupčanika na nivo vibracija prenosnika, daje modeliranje na analognim računskim mašinama. U tom cilju razvijen je model prenosnika sa višedelnim i jednodelnim zupčanicima, uz analizu i variranje odgovarajućih parametara, na ABM MN 17m. Na dobijenim grafičkim prikazima jasno se uočava razlika u dinamičkim naprezanjima zupčanika i ležišta prenosnika, kao i uticaj promene parametara.

Izvedeno je, takođe, ispitivanje dinamičkih sistema prenosnika sa složenim kinematskim šemama. Na bazi rezultata proračuna moguće je formirati odgovarajući dijagram i grafik prenosne funkcije. I dijagram i grafik govore o mogućnosti izlaska sistema iz zone očekivanih rezonanci i potvrđuju sniženje apsolutnih vrednosti prenosnih funkcija na rezonantnim frekvencama pri korišćenju zupčanika povećanog stepena prilagođavanja i elastičnim vezivanjem venca.

Razmatrano dopunsko povećanje tačnosti modela zupčastog prenosnika sa mogućim pomeranjima u pravcu tri koordinatne ose i uvedena zavisnost za analizu uticaja tipa oscilovanja oboda, kao točka sa elastičnim ojačanjima na mestima postavljanja elastičnih elemenata, na vibracione procese omogućuju adekvatno sagledavanje problematike projektovanja posmatranih zupčanika.

5. — Pri konstruisanju zupčanika razmatranog tipa veliku pažnju treba pokloniti tehnologičnosti konstrukcije, izboru materijala i perspektivnim šemama tehnologije izrade, elementima koji obezbeđuju kako visoku ekonomičnost tako i mogućnost dopunskog poboljšanja kvaliteta prenosnika u fazi izrade. Pokazano je da velike mogućnosti, u tom pravcu, predstavljaju: primena legura visokog stepena amortizovanja, armiranih kvazi-monolitnim i kvazi-slojevitim materijalima kao elastičnih elemenata i slojeva, livenog gvožđa velike čvrstoće za izradu glavčine, nanošenje vibro-izolacionih prevlaka od metalnih praškova i kompozicija polimera. Kada su u pitanju metode obrade najpovoljnije i najperspektivnije metode baziraju na deformisanju u hladnom i toplom stanju, uz završnu obradu hladnim kalibrisanjem.

Kod metoda hladnog kalibrisanja razvijen je postupak izbora racionalnih parametara režima kalibrisanja, čime se stvaraju uslovi za dopunsko povećanje veka trajanja i sniženja nivoa vibracija prenosnika. Probno kalibrisanje stvara uslove, pak, za jednostavan izbor najčešće primenjivanih parametara režima rada sa aspekta tačnosti, hrapavosti i površinske tvrdoće zuba. Za izbor dodataka za obradu kalibrisanjem izvedena su dopunska ispitivanja zavisnosti dubine rasprostiranja deformacija i izmene osobina materijala u deformisanom sloju. Analizom izmene tih karakteristika u zoni maksimalnih ekvivalentnih napona, moguće je, približno, odrediti veličinu očekivanog povećanja granice dubine kontaktne nosivosti zuba i na bazi iste izabrati racionalnu vrednost dodataka za kalibrisanje.

6. — Na završnom stadijumu konstruisanja zupčanika sa elastičnim vezama i povećanim stepenom prilagođavanja zupčastog venca, za najodgovornije prenosnike, izvodi se korigovani (tačan) proračun i eksperimentalno ispitivanje u cilju definisanja očekivanog povećanja noseće sposobnosti, veka trajanja i sniženja nivoa vibracija. Za realizaciju tog zadatka koriste se dobijene zavisnosti za $K\beta$ i K_v povećane tačnosti, kriterijuma nivo vibracija i poznata metodologija proračuna čvrstoće zupčastih prenosnika.

Primenom prikazanih elemenata, koji predstavljaju osnovu konstruisanja i proračuna samo-podešljivih zupčanika sa elastičnim vezama i povećanog stepena prilagođavanja zupčastog venca, moguće je formirati više od 20 novih konstruktivnih rešenja zupčanika tog tipa (karakteristični primeri prikazani su na slici 2 [3]).

U cilju adekvatnog ispitivanja izgrađeni su uzorci zpučanika svih grupa, ali je najpotpunije ispitivanje izvedeno kod zupčanika sa vezivnim elementima u obliku elastičnih rasečenih cilindričnih čaura, zupčanika sa zavojnim i ekscentričnim vezama preko vibro-izolacionog sloja poli-

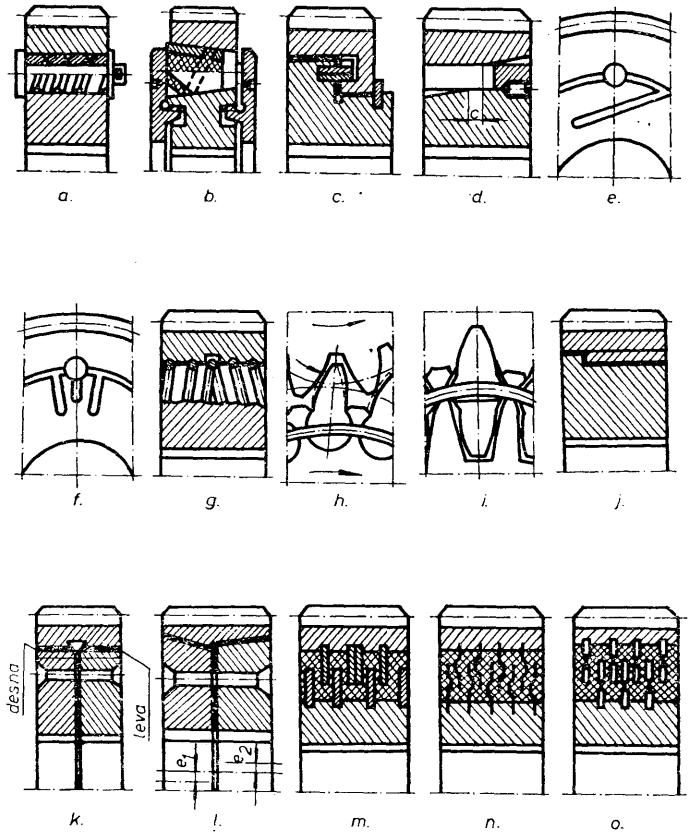
vernih materijala. Kod tih konstrukcija polimerni sloj je opterećen prvenstveno, na smanjenje, što povećava njegovu nosivost i vek trajanja. Veoma perspektivne konstrukcije zupčanika su zupčanici sa oblogama formiranim od sinterovanog praha, kao i zupčanici sa profilnim srednjim slojem izgrađenim od materijala odgovarajućeg stepena amortizovanja, uz njegovo formiranje radijalnim kovanjem ili valjanjem od višeslojnog polufabrikata. Upravo za proizvodnju pomenutih zupčanika razvijena je šema i pojedini tehnološki postupci izrade. Formirano je, takođe, i nekoliko prenosnika, kod kojih su primenjeni ili će biti primenjenji višedelni zupčanici. Ti prenosnici su: konični prenosnici traktora primenjeni u Fabrikama traktora u Minsku i Čeljabinsku, reduktori i varijatori specijalne tehnološke opreme fabrike »Himvolokno« u Mogilevu i slično.

Izvedena su i opsežna laboratorijska i eksploataciona uporedna ispitivanja novih konstrukcija i serijski proizvedenih jednodelnih zupčanika. U SSSR, u sadašnjim uslovima, ne postoje standardne metode i oprema za ispitivanje noseće sposobnosti i veka trajanja zupčastih prenosnika. Zato je, u radu, metodskim osnovama ispitivanja posvećena znatno veća pažnja. Generisane su preporuke najpoznatijih laboratorija i ispitivanja u INDMAŠ-u u toku više od 16-to godišnjeg ispitivanja.

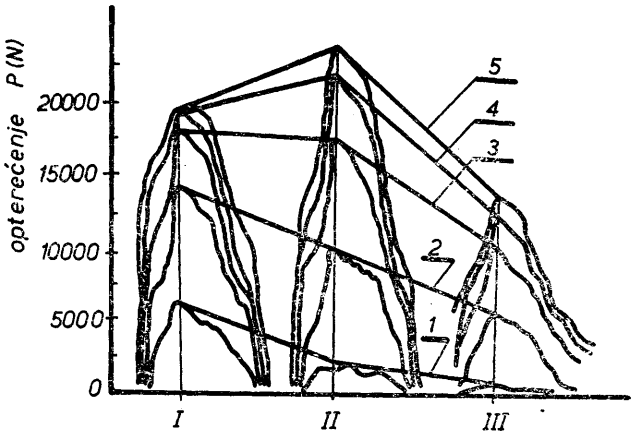
Izgrađen je niz istraživačkih punktova sa zatvorenim i otvorenim krugom snage, a takođe i pribori za univerzalne uređaje. Značajan interes predstavlja konstruisanje univerzalnih menjača sa izmenjivim međuosnim rastojanjem i mogućnošću formiranja bilo kog zakošenja, uređaja za opterećenje zuba, uređaja za ocenu oštećenja bočnih površina zuba pomoću reljefnih otisaka na plastičnoj foliji.

Metodologija ispitivanja bazira na savremenim proučavanjima prirode razaranja radnih površina i zuba u eksploataciji, posebno usled zamora materijala. Za definisanje otpornosti na habanje korišćene su nove progresivne metode površinskog ozračivanja, razvijene u saradnji saradnika INDMAŠ AN BSSR, MVTU im. Baumana i Mašinskog fakulteta u Kragujevcu — SFRJ [7], metod elektrono-grafičke analize faznog sastava i disperzije čestica produkata habanja, novi metod kvalitativne i približne kvantitativne ocene opterećenja lokalnih delova zuba sa izmenom strukturnih karakteristika materijala.

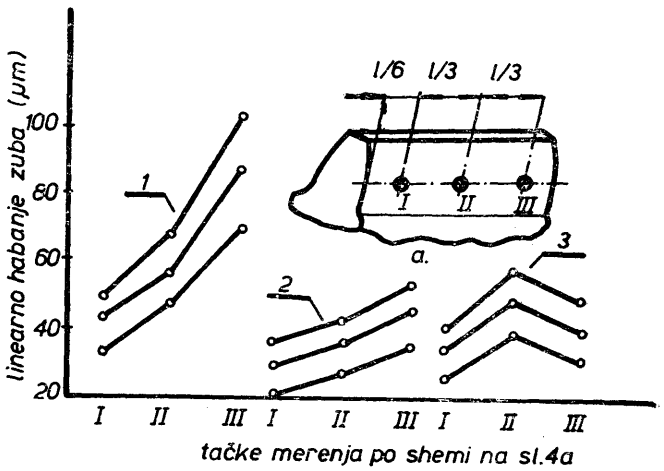
Opšta analiza rezultata ispitivanja ubedljivo potvrđuje visoku efektivnost primene zupčanika sa elastičnim vezama i povećanog stepena prilagođavanja zupčastog venca, perspektivi novo projektovanih zupčanika, celishodnosti primene razvijene metodologije za izbor parametara osnovnih elemenata zupčanika i tehnoloških šema izrade istih.



Sl. 2. — Nove konstrukcije samo-podešljivih zupčanika razvijene u INDMAŠ-u



Sl. 3. — Dijagram raspodele opterećenja u sprezanju kod višedelnih zupčanika: 1 — mrtvi hod, 2 — T = 3320, 3 — T = 6640, 4 — T = 8500, 5 — T = 10100 Nm, n = 50 o/min

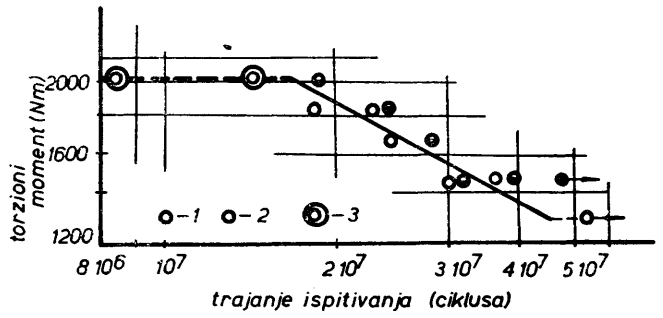


Sl. 4. — Dijagram raspodele habanja zuba zupčanika: 1 — jednodelnih zupčanika, 2. 3 — višedelnih zupčanika

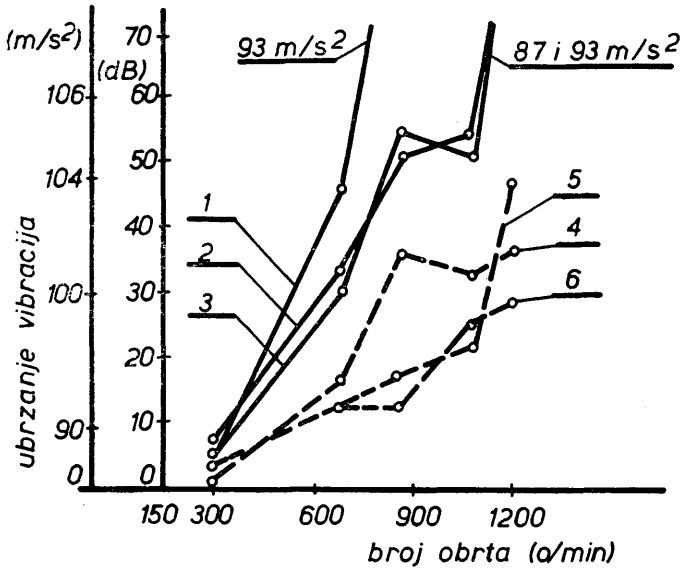
Prema rezultatima i podacima dobijenim ispitivanjima moguće je zaključiti da je postignuto:

— smanjenje vrednosti koeficijenta neravnomernosti raspodele opterećenja duž kontaktne linije od 1,7—2,1 do 1,05—1,15 (slike 3 i 4),

— povećanje granične kontaktne i savojne nosivosti zuba zupčanika od 1,2—1,4 puta, veka trajanja na bazi tih kriterijuma i otpornosti na habanje radnih površina zuba za 1,5—2,5 puta (slike 4 i 5).



Sl. 5. — Ispitivanja kontaktne nosivosti zuba: 1 — jednodelnih, 2 — višedelnih zupčanika, 3 — 10 m zuba usled zamora materijala



Sl. 6. — Novo ubrzanje vibracija pri ispitivanju: 1, 2, 3 — jednodelnih, 4, 5, 6 — višedelnih zupčanika- 1, 4 — T = 100; 2,5 — T = 200; 3,6 — T = 300 Nm.

Analiza oštećenja zuba usled zamora materijala (pitting) i mestimičnih lomova ukazuje na njihov zamorni karakter. Evidentna je značajna neravnomernsot oštećenja u poređenju sa arspodelom opterećenja duž kontaktnih linija pri sprezanju jednodelnih zupčanika i njeno adekvatno smanjenje pri sprezanju višedelnih zupčanika.

Na taj način se postiže sniženje nivoa vibracija ispitivanih zupčanika i elemenata prenosnika za 6—10 dB i više ili 2—3 puta po apsolutnim vrednostima (slika 6). Postojanost ovog efekta je evidentna u širokom dijapazonu režima i pri dugotrajnim ispitivanjima.

Uvođenje preporuka, metodologije, opreme, novih konstrukcija u fabrikama »Himvolokno« (g. Mogilev), fabrici traktora u Čeljabinsku i drugim fabrikama, dovelo je do značajnih ekonomskih efekata.

LITERATURA

1. РЕШЕТОВ Л. Н. Конструирование рациональных механизмов. — М.: Машиностроение, 1972. — 256 с.
2. БИРУЛЯ А. Л., ГРИНКЕВИЧ В. К., ПОРЯДКОВ В. И., МАЛЬЦЕВ А. А. Экспериментальное исследование виброизоляции зубчатого колеса. — Вестник машиностроения, 1974, № 3, с. 35—36.
3. БЕРЕСТНЕВ О. В., СОБОЛЕВ А. С. Зубчатые колеса пониженной виброактивности. — Минск: Наука и техника, 1978. — 120 с.
4. ПЕТРУСЕВИЧ А. И. Зубчатые передачи. В кн: Детали машин. Расчет и конструирование. Справочник, т. 3 — М.: Машиностроение, 1969, с. 15—156.
5. БЕРЕСТНЕВ О. В., ЛЕЗНЯК Г. К. и др. Методические руководства по расчету и экспериментальным исследованиям распределений нагрузки в зацеплении зубчатых колес. — Минск: ИНДМАШ АН БССР, 1981. — 80 с.
6. БЕРЕСТНЕВ О. В. Метод оценки виброактивности зубчатых передач по собственным формам динамических систем. — Известия Академии наук БССР. Серия физико-технических наук, 1982, № 2, с. 14—21.
7. ЦИТОВИЧ И. С., БЕРЕСТНЕВ О. В., СКОРЫНИН Ю. В., НАСЛЕДЫШЕВ Ю. К., Б. ИВКОВИЧ, Б. ЕРЕМИЧ, М. ЛАЗИЧ, З. ПАЛУНЧИЧ и др. Развитие и совершенствование радиоизотопных методов исследования трибологических явлений в деталях машин и инструменте. — Минск: ИНДМАШ АН БССР, 1979. — 33 с.
8. БЕЛЫЙ В. А., СТАРЖИНСКИЙ В. Е., ЩЕРБАКОВ С. В. Металлополимерные зубчатые передачи. — Минск: Наука и техника, 1981. — 352 с.

SHP — SEPARATOR

DA LI ZNATE KOLIKE SU UŠTEDE

- **poboljšanjem hladivih svojstava sredstava za hlađenje i podmazivanje**
- **povećanjerm veka trajanja alata**
- **poboljšanjem kvaliteta obrađenih površina**
- **produženjem veka trajanja sredstava za hlađenje i podmazivanje na nekoliko puta?**

Odgovor će Vam dati uređaj

SHP — SEPARATOR