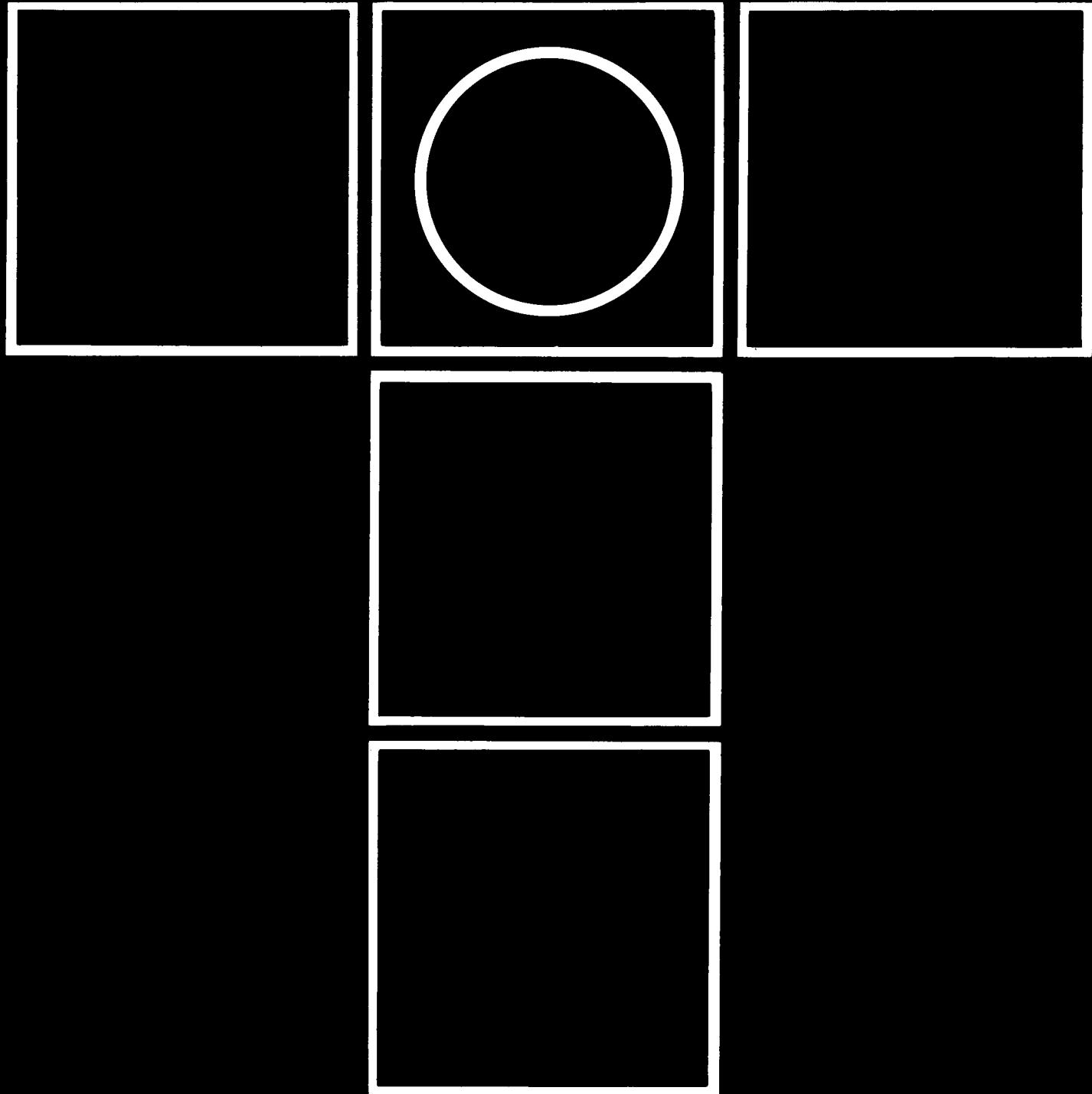


tribologija u industriji

YU ISSN 03551-1642
GODINA XIII
MART 1991

1



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

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

UVODNIK INTRODUCTION ПЕРЕДОВИЦА	B. IVKOVIĆ: Tribološki rečnik - skup termina iz oblasti tribologije - Dictionary of Tribology Terms - Словарь по трибологии	3
ISTRAŽIVANJA RESEARCH ИССЛЕДОВАНИЯ	B. JEREMIĆ, N. MILIĆ, M. BABIĆ, M. MEYER: Uticaj geometrije kontakta na proces razaranja sloja čvrstog maziva - Influence of Contact Geometry on Process of Solid Lubricant Layer Destruction - Воздействие геометрии контакта на процесс разрушения твердого слоя смазки	5
	B. TADIĆ: Mogućnost praćenja habanja preko funkcija priraštaja otpora rezanja - Connection Between Increasing Cutting Force and Wear Parameter - Возможность наблюдения за изнашиванием инструмента через функцию прироста сопротивления	12
	Z. NIKIĆ, S. PAJEVIĆ: Rotaciono izvlačenje konusnih delova - The Rotary Drawing of Cone Parts - Ротационная штамповка конических деталей	17
NOVOSTI NEWS ИЗВЕСТИЯ	Srebrni jubilej tribologije CM4000 automatski analizator ulja Ručna pumpa specijalne namene Tribološki rečnik	25 26 26 27
KNJIGE I ČASOPISI BOOKS AND JOURNALS КНИГИ И ЖУРНАЛЫ	28
NAUČNI SKUPOVI SCIENTIFIC MEETINGS НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ	31
REZIMEA ABSTRACTS РЕЗЮМЕ	32

Tribološki rečnik - skup termina iz oblasti tribologije

Tribologija kao nauka i tehnologija razvija se u industrijskim zemljama veoma brzo, a prisutna je sve više ne samo u oblasti održavanja proizvodne opreme, već i u projektovanju proizvoda i tehnologije i upravljanju proizvodnim procesima.

U svakodnevnom poslovnom životu, proizvodnoj i drugoj dokumentaciji i publikacijama iz oblasti tehnike svih vrsta pojavljuju se brojni termini koji su u vezi sa tribološkim procesima na direktni ili indirektni način, a označavaju neke veličine, pojave ili procese.

Nije redak slučaj da se ista veličina, pojava ili proces označava različitim terminima. Tipičan primer je klasifikacija mehanizama habanja. U literaturi iz oblasti tribologije, a naročito u knjigama i časopisima iz drugih oblasti tehnike nailazi se često na termine o mehanizmima habanja kao što su difuziono habanje, adhezionalno habanje, oksidno habanje, hemijsko habanje, zamorno habanje, koroziono habanje, tribometrijsko habanje, abraziono habanje i sl. Pod tribomehanijskim habanjem, međutim, podrazumeva se hemijsko, oksidaciono, koroziono i difuziono habanje. Kada se govori o mehanizmima habanja elemenata tribomehaničkih sistema očigledno je da treba izvršiti unifikaciju termina u ovoj oblasti da ne bi dolazilo do nespo-

razuma u interpretaciji rezultata istraživanja i primeni raspoloživih znanja u praksi.

Na izradi rečnika triboloških pojmove i termina radi se već duže vremena u većini razvijenih industrijskih zemalja. U SSSR-u je jedan broj termina definisan odgovarajućim standardima, a 1979 godine izdat je i Rečnik - Priručnik iz oblasti trenja, habanja i podmazivanja elemenata mašina. Ne treba shvatiti da je ovim ovaj važan posao završen. Na protiv, početni rezultati rada u ovoj oblasti ukazuju na neophodnost organizovanja dugoročnog sistematskog rada u ovoj oblasti uz korišćenje izvora informacija sa više jezičkih područja. Brojni pojmovi iz oblasti tribologije definisani su u priručniku TRIBOLOGY HANDBOOK u čijem stvaranju je učestvovao veliki broj naučnih radnika sa engleskih univerziteta i instituta (preko 100) ali još uvek znatan broj termina nije obuhvaćen ovom publikacijom. Međunarodna organizacija OECD je još 1962. godine formirala jednu podgrupu u okviru Research Group On Wear of Engineering Materials (Istraživačka grupa za probleme habanja inženjerskih materijala) koja je imala zadatak da definiše termine koji se često koriste u oblasti trenja, habanja i podmazivanja.

U to vreme Tribologija kao termin još nije postojao (Tribologija se kao termin pojavljuje prvi put 1966. godine). Posle prvih materijala radnog karaktera koji su imali ograničenu cirkulaciju izdat je 1969. godine rečnik termina i definicija iz oblasti trenja, habanja i podmazivanja - tribologije i to na engleskom, nemачkom, francuskom, italijanskom, španskom i japanskom jeziku. Preporučeno je institucijama i pojedincima da u tehničkim publikacijama i radovima koji se objavljaju u časopisima koriste usaglašenu terminologiju. Broj termina i definicija obuhvaćenih rečnikom nije veliki. Postojala je nuda da će u godinama koje dolaze rečnik biti obogaćen novim terminima i definicijama dobijenim od novih saradnika. Veći napori u ovoj oblasti činjeni su u svakom jezičkom području posebno tako da danas ima više podataka o unificiranim terminima iz oblasti tribologije, na primer u Nemačkoj, Francuskoj itd. Na našem jeziku napora u ovoj oblasti do sada nije bilo ili ako ih je i bilo nisu dali rezultate koji su dostupni široj javnosti.

Jugoslovenski komitet za tribologiju formiran pre nekoliko godina predviđeo je u svom programu rada i rad na unifikaciji termina iz oblasti tribologije ali kao jugoslovenska institucija nije uspeo da ostvari ni jedan projekat na saveznom nivou kroz koji bi mogao da

se organizuje i finansira i ovaj rad. Kako je tribologija kao nauka i tehnologija već značajno prisutna i na našim prostorima (kao nastavni predmet sluša se već nekoliko godina na većini mašinskih fakulteta u zemlji, na primer), to se potreba za unifikacijom termina i definicija pojmoveva iz ove oblasti sve više oseća.

Časopis TRIBOLOGIJA U INDUSTRIFI ulazi u trinaestu godinu svog postojanja i pored velikih teškoća sa kojima se suočavao i suočava u obezbedjenju potrebnih sredstava. Uprkos tome što ova godina ne obećava bolje dane u pogledu finansiranja (najavljen je i prekid finansijske podrške Repu-

bličkog fonda za nauku Srbije), u program časopisa za ovu godinu ulazi i objavljanje termina i definicija iz oblasti tribologije na našem jeziku. Broj termina koji će biti štampan u ovoj godini neće biti veliki (predviđa se prostor od dve strane u časopisu), delimično i zbog toga što u ovoj prvoj godini treba savladati i osnovne teškoće koje se u ovakvim poslovima javljaju, a odnose se na formiranje radnih timova, način rada i sl.

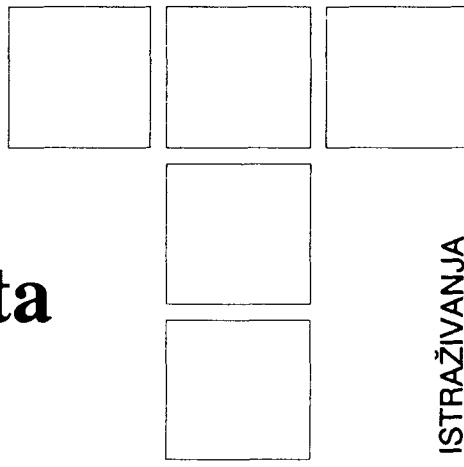
U ovom ili jednom od narednih brojeva biće štampane osnovne definicije nekoliko termina koji počinju slovom A kao na primer, ABRAZIVNO HABANJE, ABRAZIVNE ČESTICE i sl. koje

predstavljaju predlog na koji korisnici časopisa treba da daju svoje mišljenje. Tek posle razmatranja svih prispevkih mišljenja na radnoj grupi koja će biti u međuvremenu formirana usvojiće se konačan tekst predloženih definicija.

Rečnih triboloških termina na našem jeziku može da doprinese boljem razumevanju triboloških pojava i procesa u tribomehaničkim sistemima u praksi i kvalitetnijem razvoju istraživanja u oblasti trenja, habanja i podmazivanja. Ovo su i osnovni razlozi zbog kojih se očekuje okupljanje odgovarajućih naučnih radnika oko ovog projekta.

B. JEREMIĆ, N. MILIĆ, M. BABIĆ,

M. MEYER



ISTRAŽIVANJA

Uticaj geometrije kontakta na proces razaranja sloja čvrstog maziva

1. UVOD

Brzi razvoj savremenih tehničkih sistema za rad u ekstremnim uslovima okruženja uslovio je osvajanje i sve veću primenu čvrstih maziva. Ova maziva se mogu primenjivati i kod tribomehaničkih sistema koji rade u agresivnim sredinama, na visokim temperaturama i pritiscima i pod uticajem različitih vrsta zračenja, kakve se sreću u vojnoj i vazduhoplovnoj industriji, kao i kod svemirskih sistema. Poslednjih godina se, međutim, širi oblast njihove primene i na ostale grane industrije (metaloprerađivačka, automobiliška, mašinogradnja itd.).

Danas se najčešće koriste čvrsta maziva na bazi molibden disulfida (MoS_2), politetrafluoretilena (PTFE), volfram di-sulfida (WS_2) i grafita.

Osnovne specifičnosti čvrstih maziva se odnose na visoke temperature oksidacije na vazduhu (670 K za MoS_2 ili 780 K za WS_2), visoke temperature razlaganja u vakumu (1370 K za MoS_2 odnosno 1670 K za WS_2), a izuzetno stabilne karakteristike imaju i na veoma niskim teperaturama.

U cilju unapredjenja njihove antikorozione funkcije danas se razvijaju i višenamenska čvrsta maziva, od kojih se zahteva da smanjuju trenje, habanje i, uopšte, rasipanje energije u kritičnim tribomehaničkim sistemima. Veoma je značajna njihova primena kod tehničkih sistema sa tačnošću pozicioniranja do $2 \mu\text{m}$, kakvi su roboti ili neki drugi mehanotrošni savremeni sistemi kod kojih zadovoljavaju i u pogledu ravnomernosti kretanja, bez "stick - slip" pojave. Takođe,

čvrsta maziva omogućavaju dug vek tribomehaničkih sistema bez dopune ili zamene podmazujućeg medijuma. Njihovom primenom se povećava eksplataciona pouzdanost tehničkih sistema eliminisanjem podsistema za snabdevanje mazivom i kontrolu parametara podmazivanja, tako da dolazi do značajnog povećanja uspešnosti i smanjenja troškova održavanja.

Relativno jeftin i jednostavan način njihovog nanošenja, njihove antihabajuća, antikoroziona i podmazujuća dejstva i široke mogućnosti industrijske primene čine ih interesantnim za tribometrijska istraživanja. Kako je strategija razvoja tehničkih sistema usmerena na povećanje njihove pouzdanosti i tačnosti obavljanja funkcija u ekstremnim uslovima okoline, može se zaključiti da budućnost primene čvrstih maziva tek dolazi.

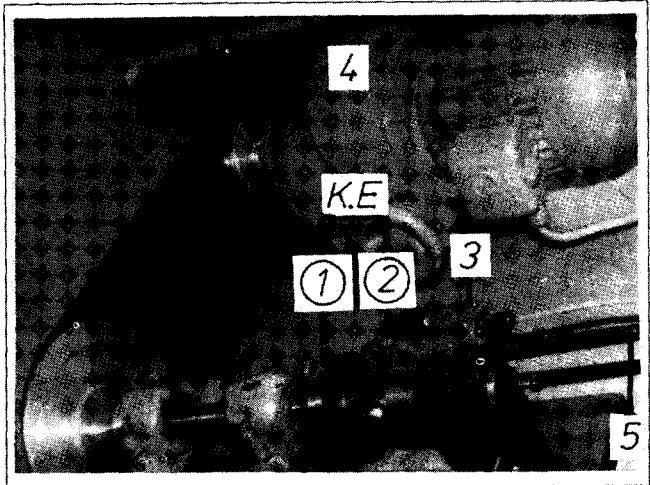
S obzirom da u našoj zamlji još uvek ne postoji veći broj objektivnih - nekomercijalnih informacija o mogućim tribološkim efektima primene čvrstih maziva, to je i bio motiv za njihova tribometrijska ispitivanja u različitim kontaktnim uslovima kontinualnog klizanja (geometrija kontakta, brzine klizanja, normalno opterećenje).

Sva eksperimentalna istraživanja koja se prikazuju u ovom radu obavljena su u Laboratoriji za tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, a vršena su u okviru programa primene savremenih saznanja iz oblasti tribologije na neke proizvode naše namenske industrije.

2. EKSPERIMENTALNI USLOVI

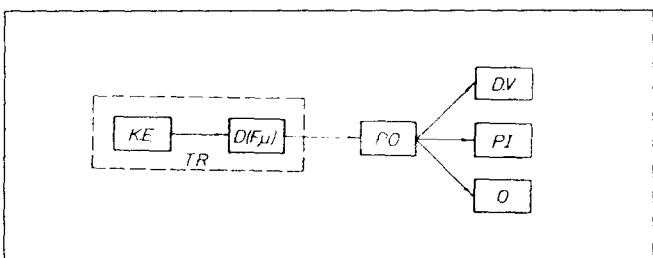
2.1 Merni lanac

Ispitivanja triboloških karakteristika čvrstih maziva vršena su na univerzalnom tribometru TR - 1 koji omogućava "pin on disc" ili "disc on disc" geometriju ostvarivanja kontakta, sa kontinualnom regulacijom brzine klizanja, a koji je prikazan na slici 1.



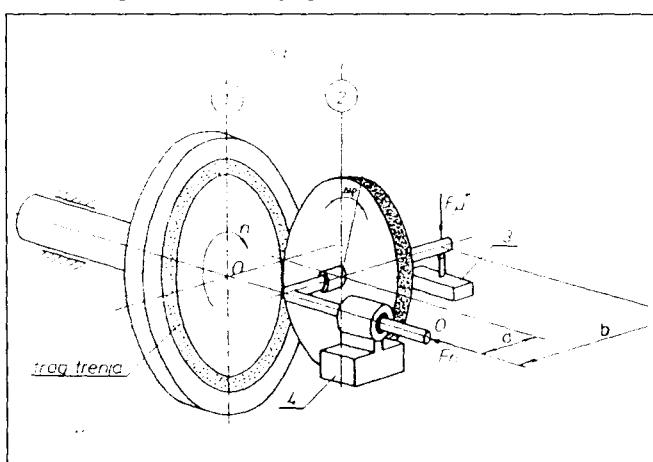
Sl. 1. - Tribometar (K.E. - kontaktni elementi, 1 - pokretni disk, 2 - nepokretni disk, 3 - dinamometar za merenje sile trenja, 4 - pogon sa kontinualnom regulacijom, 5 - poluga za prenošenje opterećenja).

Tribometar je deo mernog lanca koji je korišćen u istraživanjima, a čija se osnovna struktura sastoji od elemenata prema silici 2.



Sl. 2. - Merni lanac (TR - tribometar, K.E. - kontaktni elementi, D(F μ) - dinamometar sa mernim trakama za merenje sile trenja, PO - pojačavač HBM KWS 3073, DV - digitalni voltmetar za električno uravnoteženje pojačavača SOLARTRON 7040, PI - pisač RIKADENKI R-50, O - dvokanalni osciloskop TEKTRONIX 422)

U konstrukciji tribometra je udovoljeno variranju kontaktne geometrije elemenata, tako da je moguće ostvariti kontakt po površini i po liniji, a što je prikazano na slikama 3 i 4.



Sl. 3. - Geometrija kontakta "disc on disc" - linijski kontakt (K.E. - kontaktni elementi, 1 - pokretni disk, 2 - nepokretni disk, 3 - dinamometar za merenje sile trenja, 4 - nosač sa kotrljajućom vodicom)

Čvrsta maziva su nanošena na obod nepokretnog diska, odnosno, na čeonu površinu pina. Zaokretanjem diska za ugao $\Delta\varphi$, ili promenom pina, omogućeno je ponavljanje većeg broja eksperimenata pri istim uslovima i dobijanje pouzdanih rezultata istraživanja. Pri normalnom opterećenju silom F_n dolazi do ostvarivanja kontakta između diskova, odnosno diska i pina. Zbog procesa trenja u zoni kontakta, nepokretni disk ili pin (2) sa polugom na kojoj se fiksiraju, teže da ostvare rotaciju oko ose O-O. Ovome se suprostavlja dinamometar koji registruje силу F_μ^* . Ova sila predstavlja proizvod stvarne sile trenja F_μ i odnosa dužine a/b. Signal sile trenja se sa dinamometra prenosi u pojačivač, preko koga se neprekidno registruje na pisaču u toku procesa istraživanja.

2.2 Kontaktni elementi

Kontaktne elemente su činili pokretan disk i nepokretan disk ili pin. Diskovi su bili izrađeni od čelika Č.5420 cementiranog do dubine $f=1 \div 1.2$ mm i sa tvrdoćom od 58 HRC. Kontaktne površine su obradene brušenjem uz obezbeđenje kvaliteta N5.

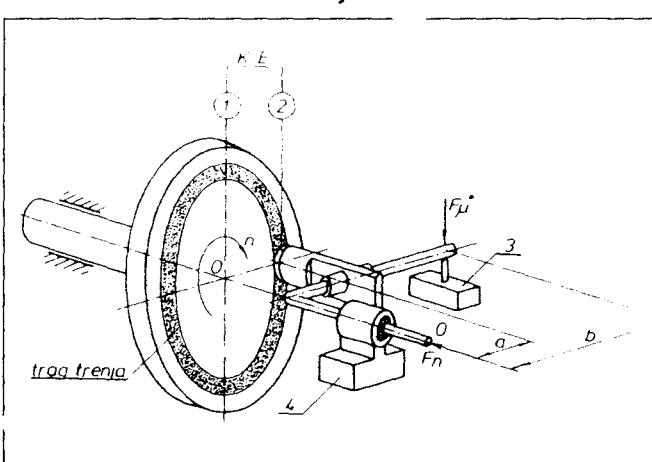
Pinovi su bili izrađeni od čelika Č.4721 cementiranog do dubine $f=0.6 \div 0.8$ mm i sa tvrdoćom HRC ≥ 58 . Kontaktne površine su obradene brušenjem na kvalitet N5.

U pripremi za ispitivanje, pod istim uslovima je termički obradeno i brušeno po deset pokretnih i nepokretnih diskova odnosno, pinova. Ovo je veoma bitno sa aspekta tehnološkog nasledja i sa aspekta ostvarivanja dobrih adhezionih veza između osnovnog materijala i sloja čvrstog maziva.

2.3 Čvrsta maziva

U cilju istraživanja na nepokretnе kontaktne elemente su nanošene dve vrste čvrstih maziva (u daljem tekstu M-1 i M-2).

Mazivo M-1 se formira pomoću crne, disperzije tečnosti sa mirisom ketona. Ova tečnost sadrži 5 mg/m^3 molibden disulfida (MoS_2), organske smole, 2-butanon i komponente anti-



Sl. 4. - Geometrija kontakta "pin od disc" - kontakt po površini (K.E. - kontaktni elementi, 1 - pokretni disk, 2 - nepokretni pin, 3 - dinamometar za merenje sile trenja, 4 - nosač sa kotrljajućom vodicom)

mona u ukupnom iznosu od 0.5 mg/m^3 . Ovo mazivo na bazi MoS_2 je razvijeno prvenstveno za potrebe vazduhoploštva za obrazovanje slojeva na kritičnim elementima, kao što su ležajevi, hidraulični elementi, a danas se sve više primjenjuje i kod ostale vojne opreme, automobila, hidraulike, poljoprivrednih mašina i dr.

Mazivo M-2 se formira pomoću bele tečnosti sa mirisom acetona. U ovoj tečnosti se nalazi politetrafluoretilen (PTFE), ogranske smole i 2-butanon. Koristi se za podmazivanje zupčanika, vratila, osovina, kugličnih ležajeva, čaura, zglobova, itd.

Oba maziva su nanošena na kontaktne elemente u Laboratoriji za tribologiju na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Tehnologija nanošenja se sastoji od pripreme površine i nanošenja odgovarajućeg maziva. Priprema površine obuhvata prethodnu obradu kontaktnih površina (brušenje) i njeno detaljno čišćenje i odmašćivanje u ultra-zvučnom kupatilu (korišćenjem 96-to procentnog alkohola). Od pravilnog i korektnog izvođenja ove faze najviše zavisi i uspešnost ostvarivanja uniformnog sloja maziva na kontaktnom elementu u sledećoj fazi. Formiranje čvrstog mazivog sloja se sastoji iz nanošenja tečnosti sa mazivim komponentama i odgovarajućeg termičkog tretmana (vezanog za proces isparavanja, molekularnog vezivanja i očvršćavanja mazivog sloja).

2.4 Uslovi ostvarivanja kontakta

U zavisnosti od ostvarene geometrije kontakta na tribometru (slike 3. i 4.), pri ispitivanju je ostvaren linijski kontakt sa dužinom dodira od 8 mm, odnosno, kontakt po kružnoj površini prečnika 6 mm.

U eksperimentalnom istraživanju je osim čvrstog maziva korišćeno i ulje za podmazivanje INA-POLAR 55K, koje je nanošeno na površinu pokretnog diska njenim naujivanjem. Korišćeno je ovo ulje, koje se zbog svojih polarnih karakteristika dobro vezuje za kontaktne površine, gde obrazuje monomolekularni sloj, koji je, zbog dobrih adhezionih veza sa osnovnim materijalom, slučan sloju čvrstog maziva. Odbaranom kombinacijom aditiva, sa ovim uljem, je postignut povoljan odnos statickog i dinamičkog koeficijenta trenja, uz eliminaciju pojave "stick-slip"-a pri malim brzinama klinanja. Na ovaj način je omogućeno upoređivanje ponašanja čvrstih i "klasičnih" maziva pri identičnim uslovima ispitivanja.

Osim vrste maziva, pri ispitivanju, je menjana i brzina klinanja u opsegu: $V = 1.5 \div 6 \text{ (m/s)}$ i nivo normalnog opterećenja: $F_n = 1 \div 15 \text{ (daN)}$.

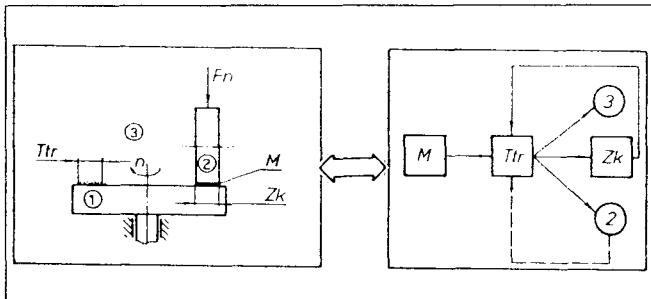
Osnovni proračun nominalne površine kontakta za usvojeni opseg promene normalne sile F_n ukazuje na visoka opterećenja u zoni kontakta, koja su naročita izražena u uslovima linijskog kontakta.

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Sva eksperimentalna istraživanja su vršena sa ciljem da se sagleda mehanizam razaranja i vek trajanja sloja čvrstog maziva kao i nivo rasipanja energije (koeficijent trenja) i uticaj geometrije kontakta na ove parametre. Pored toga, utvrđivane su i mogućnosti nanošenja čvrstih maziva M-1 i M-2 na različite mašinske elemente.

3.1 Mehanizam razaranja i vek trajanja sloja čvrstog maziva

Velikim brojem ponavljanja eksperimenata i praćenjem izgleda kontaktne površine pomoću mikroskopa utvrđeno je da se mehanizam razaranja sloja čvrstog maziva zasniva na prenosu masa sa jednog na drugi kontaktne element. Ova saznanja su poslužila za postavljanje modela razaranja koji je prikazan na slici 5.



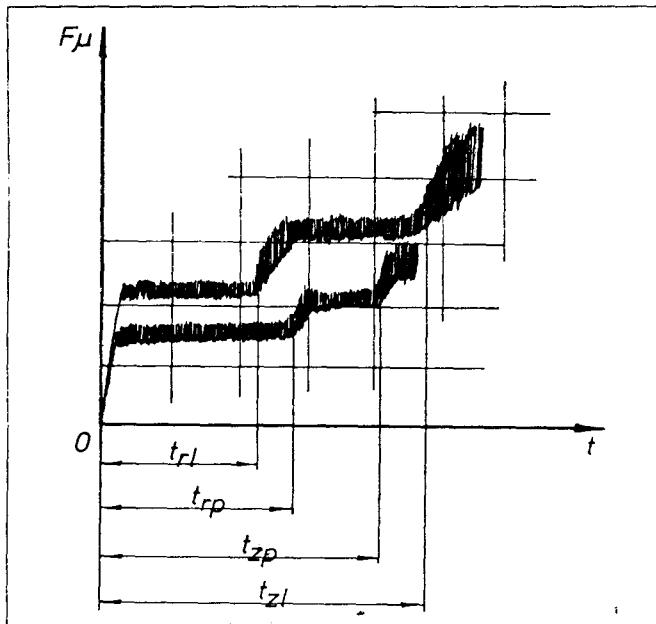
Sl. 5. - Prenos mase u procesu razaranja sloja čvrstog maziva

Osnovne faze procesa razaranja su:

- a) Sa nepokretnog kontaktne elementu 2, na kome se nalazi sloj čvrstog maziva M, čestice se kontinualno odvajaju i usled procesa adhezije se vezuju na površinu traga trenja (T_{tr}) na pokretnom elementu 1.
- b) Zbog obrtnog kretanja elementa 1, deo čestica maziva sa traga trenja ponovo dolazi u zonu kontakta (Z_k), drugi deo se taloži na nepokretnom elementu 2 van zone kontakta, a ostatak, usled dejstva centrifugalnih sila odlazi u okolinu 3.
- c) Čestice koje su se nataložile na elementu 2, van zone kontakta, se u toku daljeg procesa ponovno periodično odvajaju i sa novoodvojenim česticama čvrstog maziva se vezuju na površinu traga trenja.

Opisane faze se kontinualno ponavljaju za sve vreme ostvarivanja kontakta, odnosno relativnog kretanja kontaktne elemenata.

Neophodno je napomenuti da je u slučaju "pin-on-disc" kontaktne geometrije, dolazak jednog dela čestica maziva sa traga trenja u zonu kontakta otežan, odnosno smanjen zbog same geometrije pina - nepokretnog elementa. Njegova kontaktna površina koja naleže na površinu pokretnog diska, ima oborene ivice ($2/45^\circ$), koje se ponašaju kao brisači - grebači maziva sa traga trenja i usled ovog efekta smanjen je broj čestica maziva koje se vraćaju u zonu kontakta.



Sl. 6. - Promena sile trenja u procesu razaranja sloja čvrstog maziva (t_{r1} - vreme do razaranja kod liniskog kontakta, t_{rp} - vreme do razaranja kod površinskog kontakta, t_{z1} - vreme do zaribavanja kod liniskog kontakta) t_{zp} - vreme do zaribavanja kod površinskog kontakta

Za proces razaranja sloja čvrstog maziva, karakterističan je oblik zapisa sile trenja dobijene na pisaču (slika 6.)

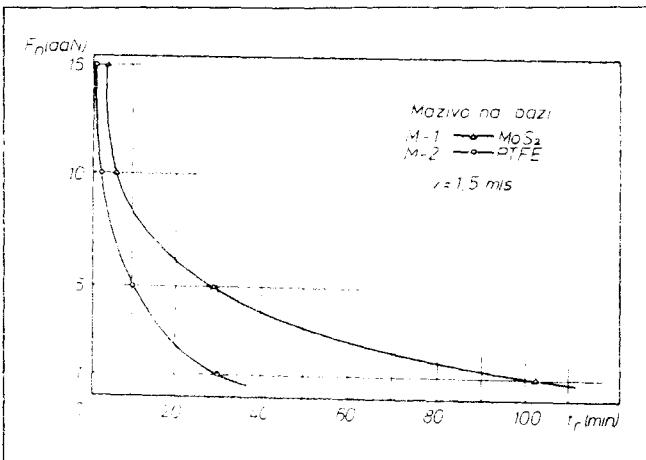
Na zapisu se uočavaju:

- početak potpunog razaranja (t_{r1} i t_{rp}), tj. delimične pojave kontakata između metalnih površina i
- početak zaribavanja (t_{z1} i t_{zp}), odnosno skoro potpun prestanak procesa podmazivanja

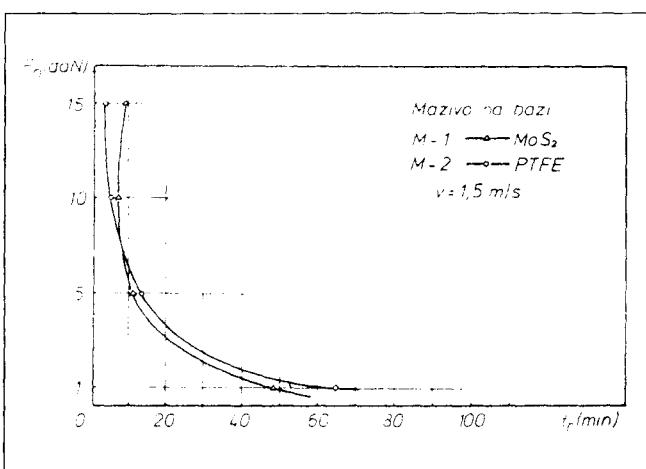
Početak procesa potpunog razaranja sloja čvrstog maziva je registrovan pomoću mikroskopa. Pri potpunom razaranju sloja dolazi do nestabilnosti procesa, odnosno do povećanja amplitude sile trenja, a posle ovog početka potpunog razaranja proces trenja se ponovo stabilizuje - amplitude se smanjuju.

Početak zaribavanja je karakterističan, takođe, po amplitudi sile trenja. Međutim, u ovom slučaju amplituda je i nekoliko puta veća u poređenju sa onom koja se pojavljuje kod početka potpunog razaranja mazivog sloja. Kod zaribavanja se odvija značajan prenos masa metala između kontaktних elemenata, a dolazi do pojave većih vibracija čitavog sistema (kontaktni elementi, njihovi nosači, poluge za prenos opterećenja itd.).

Sa slike 6. se vidi da je ovaj porast vrednosti amplitude izraženiji u slučaju liniskog kontakta ("disc-on-disc"). Ovo je posledica većeg opterećenja (kontaktnih pritisaka) u slučaju kontakta po liniji kao i činjenice, da u slučaju površinskog kontakta, do razaranja, odnosno, do zaribavanja ne dolazi po čitavoj nominalnoj površini, već samo po pojedinačnim delovima kontaktne površine. U slučaju liniskog kontakta, proces razaranja i zaribavanja se odvija čitavom dužinom kontakta.



Sl. 7. - Medusobna zavisnost normalnog opterećenja i vremena do razaranja sloja čvrstog maziva za slučaj liniskog kontakta



Sl. 8. - Medusobna zavisnost normalnog opterećenja i vremena do razaranja sloja čvrstog maziva za slučaj površinskog kontakta

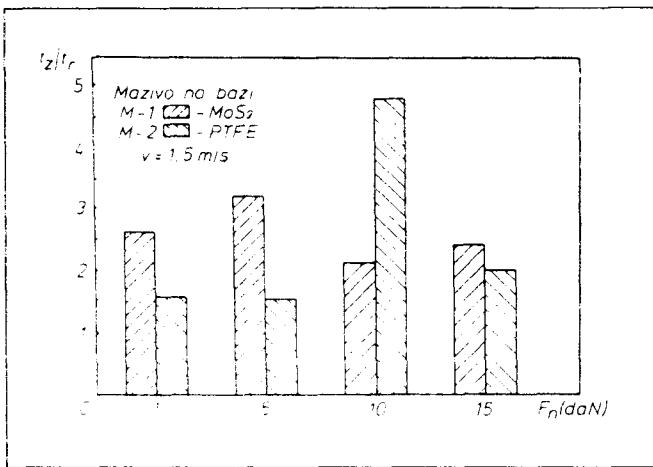
Uporedni rezultati ispitivanja sa aspektom razaranja sloja čvrstih maziva dati su na slikama 7. i 8.

Očigledna je prednost u pogledu veka trajanja maziva M-1 u odnosu na mazivo M-2 u slučaju liniskog kontakta, dok je pri kontaktu po površini ta razlika moglo manja. Ovo je posledica već opisanog efekta brisanja - grebanja maziva sa traga trenja u slučaju površinskog kontakta.

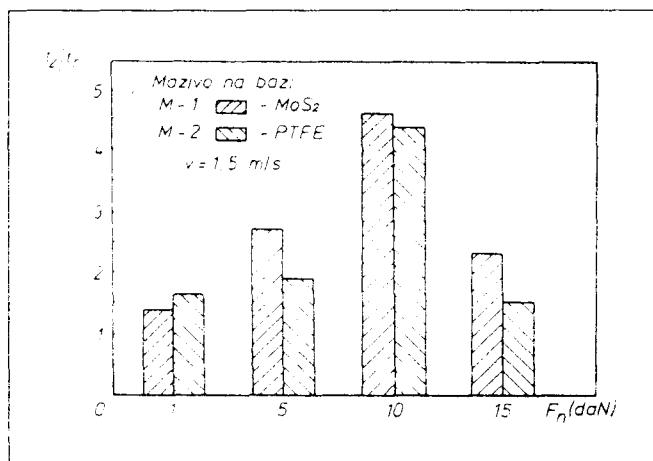
Bitna karakteristika sa gledišta eksploatacije tribomehaničkih sistema je odnos vremena do početka zaribavanja (t_z) i vremena do potpunog razaranja (t_r). Navedeni odnosi su prikazani na slikama 9. i 10.

Sa aspekta odnosa t_z/t_r vidna je prednost maziva M-1. Upoređujući rezultate sa slikama 9. i 10. dolazi se do zaključka da je vreme do zaribavanja, u zavisnosti od opterećenja, u prosjeku 2,5 puta veće od vremena do početka potpunog razaranja za liniski kontakt, odnosno 2,8 puta kod površinskog kontakta.

Ova konstatacija je naročito značajna za tribomehaničke sisteme kod kojih se zahteva funkcionisanje i posle registro-



Sl. 9. - Uticaj normalnog opterećenja na odnos vremena do zarišavanja i vremena do razaranja sloja čvrstog maziva za slučaj linijskog kontakta



Sl. 10. - Uticaj normalnog opterećenja na odnos vremena do zarišavanja i vremena do razaranja sloja čvrstog maziva za slučaj površinskog kontakta

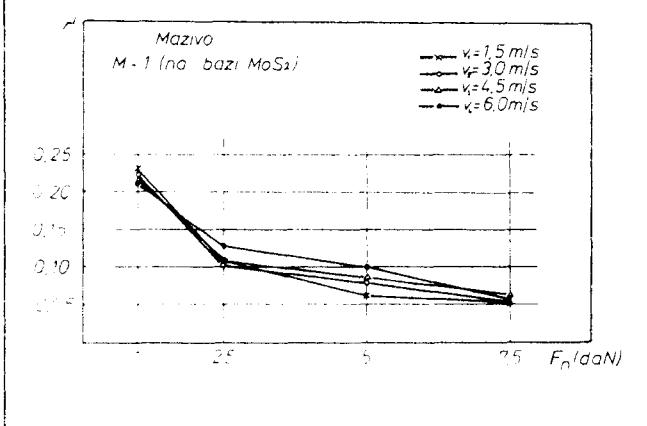
vanja parametara koji ukazuju na pojavu otkaza (nestabilnost kretanja, nivo vibracija, porast teperature, itd.). U ovom slučaju, postoji dovoljni vremenski period od trenutka dijagnostike stanja pa do intervencije, što je veoma značajno kod pojedinih elemenata vojne opreme (npr. proizvodi vazduhoplovne industrije).

3.2 Nivo rasipanja energije

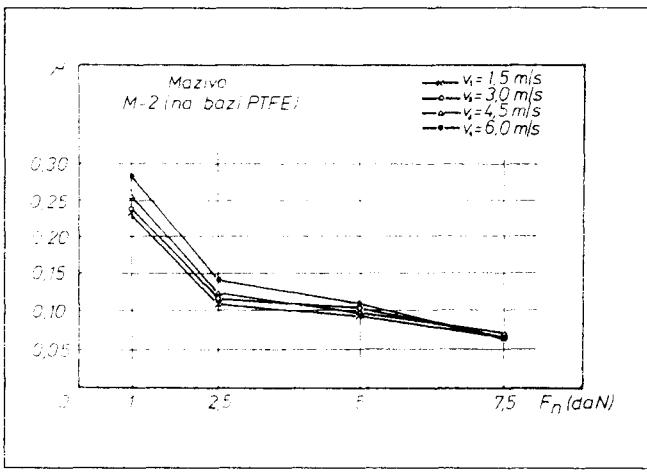
U cilju kompleksnog sagledavanja problematike vezane za čvrsta maziva, u radu se daje nivo rasipanja energije kvantificiran preko koeficijenta trenja.

U slučaju linijskog kontakta je za sva maziva dobijeno da se koeficijent trenja smanjuje sa povećanjem normalnog opterećenja (slike 11, 12 i 13).

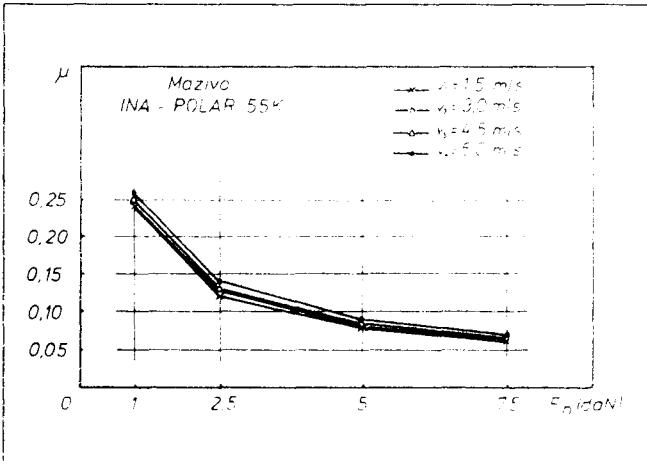
U slučaju površinskog kontakta, mazivo M-1 i M-2 se različito ponašaju (slike 14 i 15). Kod maziva M-1 koeficijent trenja raste do nivoa opterećenja $F_n = 2.5 \text{ daN}$, a zatim opada, dok kod maziva M-2 opada do nivoa opterećenja $F_n = 5 \text{ daN}$, a zatim se njegova vrednost povećava. U slučaju maziva



Sl. 11. - Uticaj normalnog opterećenja na koeficijent trenja kod maziva M-1 za slučaj linijskog kontakta



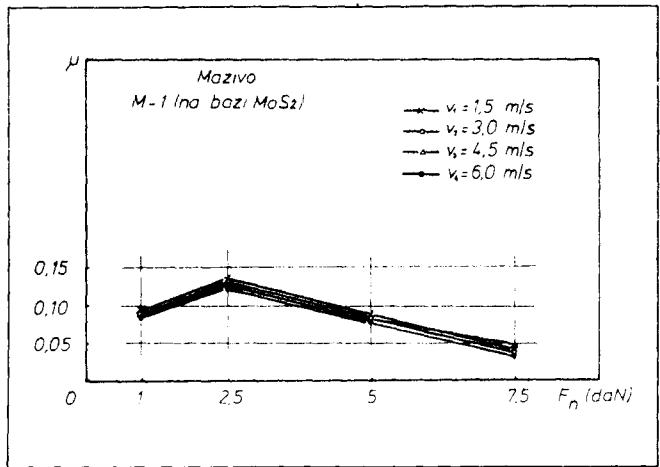
Sl. 12. - Uticaj normalnog opterećenja na koeficijent trenja kod maziva M-2 za slučaj linijskog kontakta



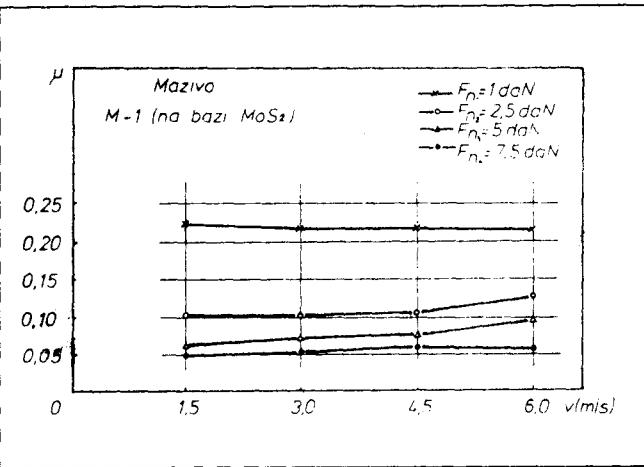
Sl. 13. - Uticaj normalnog opterećenja na koeficijent trenja kod maziva INA-POLAR 55K za slučaj linijskog kontakta

INA-POLAR 55K kontaktna geometrija ne utiče značajnije na zavisnost koeficijenta trenja od normalnog opterećenja (slike 13 i 16).

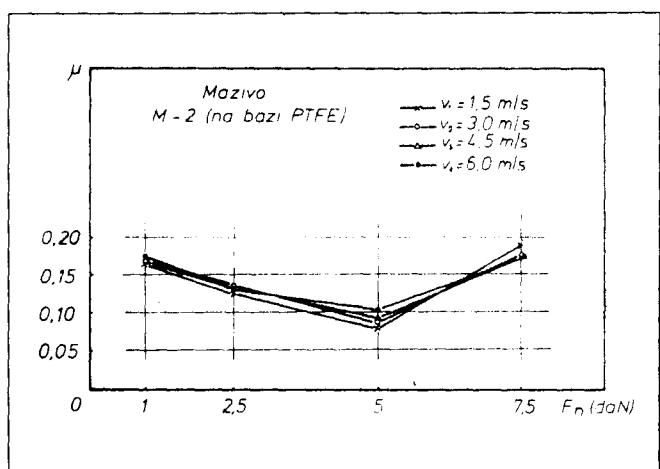
Brzina klizanja pokazuje znatno manji uticaj na vrednost koeficijenta trenja (slike 17 - 22). Karakteristična je skoro



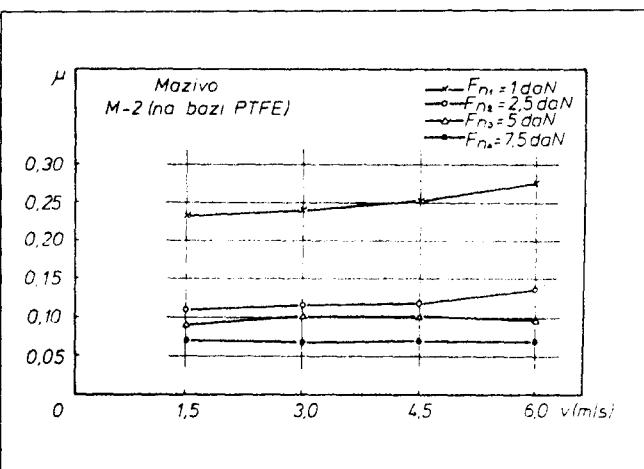
Sl. 14. - Uticaj normalnog opterećenja na koeficijent trenja kod maziva M-1 za slučaj površinskog kontakta



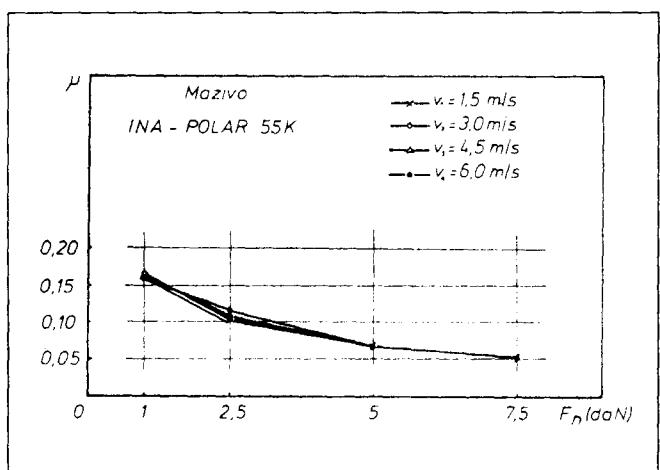
Sl. 17. - Uticaj brzine klizanja na koeficijent trenja kod maziva M-1 za slučaj linijskog kontakta



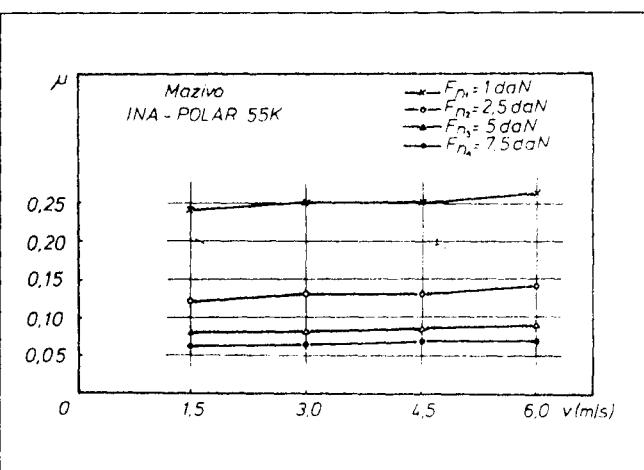
Sl. 15. - Uticaj normalnog opterećenja na koeficijent trenja kod maziva M-2 za slučaj površinskog kontakta



Sl. 18. - Uticaj brzine klizanja na koeficijent trenja kod maziva M-2 za slučaj linijskog kontakta



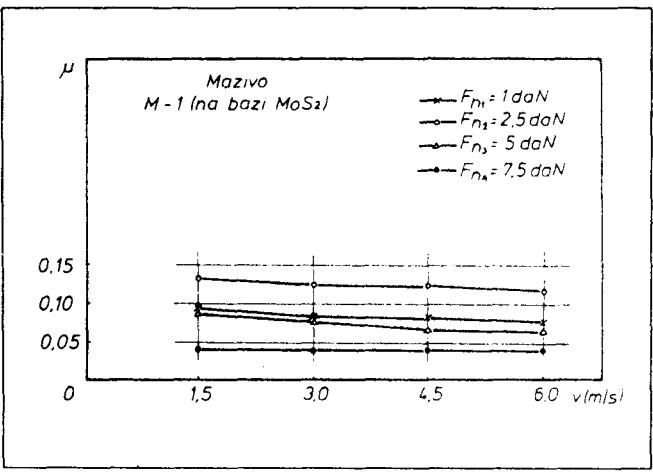
Sl. 16. - Uticaj normalnog opterećenja na koeficijent trenja kod maziva INA-POLAR 55K za slučaj površinskog kontakta



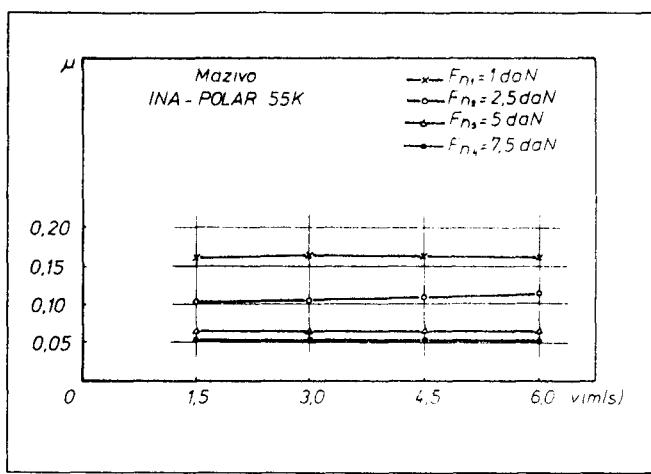
Sl. 19. - Uticaj brzine klizanja na koeficijent trenja kod maziva INA-POLAR 55K za slučaj linijskog kontakta

identična zavisnost koeficijenta trenja od brzine za maziva M-2 i INA-POLAR 55K kod linijskog kontakta (slike 18 i 19). Do blagog porasta vrednosti koeficijenta trenja sa porastom brzine (za konstantan nivo normalnog opterećenja) dolazi kod sve tri vrste maziva za linijski kontakt i kod maziva M-2 za površinski kontakt.

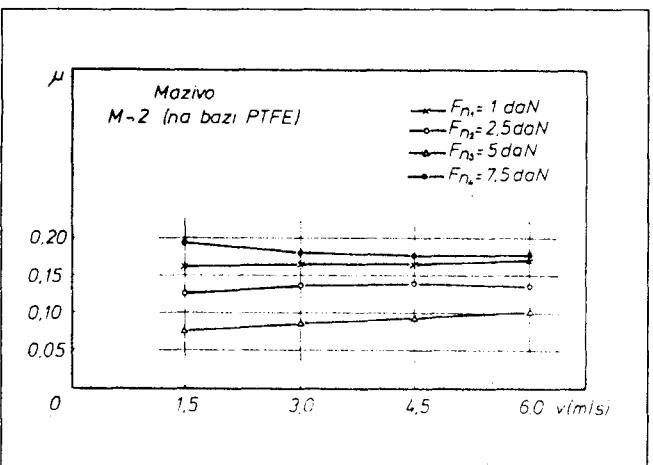
Ako posmatramo uporedni dijagram sa slike 23. može se zaključiti da se ispitivana čvrsta maziva ponašaju veoma slično za slučaj kontakta po liniji. U slučaju površinskog kontakta mazivo M-1 ima prednost do nivoa opterećenja $F_n = 2.5$ daN, u rasponu opterećenja $2.5 \div 5$ (daN) maziva se ponašaju isto, a za opterećenja preko 5 daN očigledna je



Sl. 20. - Uticaj brzine klizanja na koeficijent trenja kod maziva M - 1 za slučaj površinskog kontakta



Sl. 22. - Uticaj brzine klizanja na koeficijent trenja kod maziva INA - POLAR 55K za slučaj površinskog kontakta



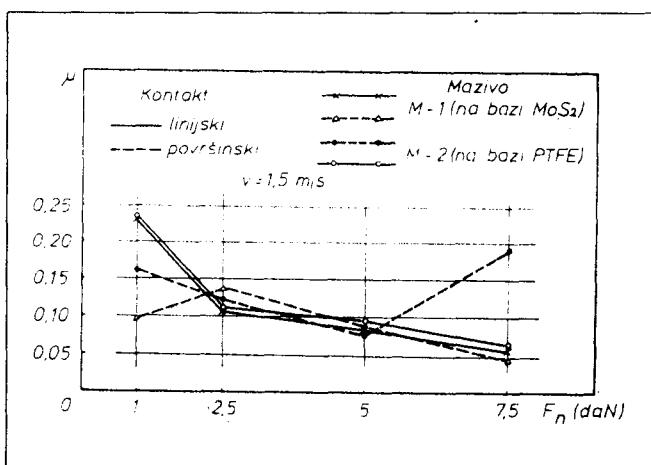
Sl. 21. - Uticaj brzine klizanja na koeficijent trenja kod maziva M - 2 za slučaj površinskog kontakta

prednost maziva M-1 (četiri puta manji koeficijent trenja u odnosu na M-2).

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu teorijske analize i izvršenih eksperimentalnih istraživanja može se dati određen broj zaključaka.

- Pouzdana tehnologija pripreme površine (prethodna obrada i čišćenje) osnovni je preduslov za uspešno formiranje slojeva čvrstih maziva.
- Proces razaranja sloja čvrstog maziva konačne debljine se odvija kroz kontinualni prenos masa na kontaktну površinu koja na sebi ne sadrži mazivi sloj. Čestice se zbog adhezionih karakteristika vezuju za površinu, ponovo dolaze u zonu kontakta ili se rasipaju u okolinu.
- Sa aspekta vremena do početka potpunog razaranja (trajanja) sloja (naročito kod linijskog kontakta), kao i sa aspekta odnosa vremena do zaribavanja i do početka razaranja (tz/tr) najbolje je mazivo M-1 (na bazi MoS₂).
- Uticaj geometrije kontakta na vrednost koeficijenta trenja je značajan za nivoe normalnog opterećenja do 2.5 daN i iznad 5 daN. Kod linijskog kontakta, koefici-



Sl. 23. - Uticaj normalnog opterećenja na koeficijent trenja za maziva M-1 i M-2 pri površinskom i linijskom kontaktu

entrenja opada sa porastom normalnog opterećenja za sva ispitivana maziva.

- Značajniju uspešnost primene ispitivanih čvrstih maziva treba očekivati kod tribomehaničkih sistema sa velikim vrednostima koeficijenta međusobnog prekrivanja kontaktnih površina i sa nižim nivoima normalnog opterećenja.

LITERATURA

- [1] B. JEREMIĆ, M. BABIĆ, N. MILIĆ, M. MEYER: Razaranje čvrstog mazivog sloja, XXIV Jugoslovenski naučno - stručni simpozij JUGOMA '90, Opatija, 1990.
- [2] M. BABIĆ, B. JEREMIĆ, M. MEYER, N. MILIĆ: Tribološko ponašanje prevlaka tvrdih maziva, XXIV Jugoslovenski naučno - stručni simpozij JUGOMA '90, Opatija, 1990.
- [3] N. MILIĆ, B. JEREMIĆ, M. MEYER: Neki rezultati uporednih ispitivanja oplemenjenih kontaktnih slojeva, časopis "Tribologija u industriji", god X, br. 2., str 37.-46., Mašinski fakultet, Kragujevac, 1988.

B. TADIĆ

Mogućnost praćenja habanja alata preko funkcija priraštaja otpora rezanja

UVOD

Poznato je [1], [2], [6] da postoji jaka koreaciona zavisnost komponentnih otpora rezanja i pokazatelja habanja alata. U literaturi se mogu sresti različiti oblici regresionih funkcija kojima se analitički reprezentira ova zavisnost.

Neki istraživači tvrde da između otpora i habanja alata postoji linearna korelativna veza dok drugi tu zavisnost izražavaju znatno složenijim regresionim funkcijama.

Sistematskim praćenjem komponentnih otpora rezanja i razvoja procesa habanja alata, utvrđena je analogija između krive habanja i krive priraštaja otpora rezanja. Ova ispitivanja izvedena su u okviru realizacije projekta "RAZVOJ PRODUKTIVNOSTI U INDUSTRiji PRERADE METALA - MFK". Testirani rezultati dobijeni su u obradi završnim struganjem, bušenjem i obimnim glodanjem.

Polazeći od krive habanja [3] kojom su definisane sve zone habanja alata došlo se do integralnog pokazatelja habanja alata na bazi praćenja priraštaja komponentnih otpora rezanja u toku procesa obrade odnosno habanja alata.

Praćenje priraštaja otpora rezanja i brzine promene priraštaja otpora rezanja moguće je na osnovu relacija datih u radu doći do postojanosti alata. Naime, do postojanosti alata dolazi se integraljenjem određenih regresionih funkcija priraštaja otpora.

1. DEFINISANJE POKAZATELJA HABANJA ALATA SA ASPEKTA PRIRAŠTAJA OTPORA REZANJA

Rezultati statističke obrade eksperimentalnih podataka ukazuju na analogiju između promene priraštaja komponentnih otpora rezanja i krive habanja alata. Trend promene priraštaja otpora u toku vremena obrade grafički se ilustruje krivom habanja identičnoj krivoj habanja alata.

*Branko Tadić, dipl. ing.
Mašinski fakultet, Kragujevac*

Imajući u vidu ovu analogiju logično je priraštaj otpora u vremenu izraziti istom regresionom funkcijom kao i krivu habanja alata, odnosno jednačinom regresije:

$$(\Delta F - \Delta F_p) = K_1 \cdot (t - t_p) + K_2 \cdot (t - t_p)^3 \dots .1$$

gde je: $\Delta F = F(t) - F(t=0)$ - priraštaj otpora u vremenu
 ΔF_p - priraštaj otpora u prevojnoj tački
 t_p - vreme rezanja do prevojne tačke
 K_1, K_2 - odredene konstante.

Kako je pokazano [3], jednačina (1) može se napisati u obliku pogodnjijem za primenu odgovarajućih računarskih programa regresione analize, odnosno:

$$\Delta F = C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^3 + C_3 \cdot t^5 \dots .2$$

ili u slučaju pojave ekstremuma, pri obradi podataka sa jednačinom (2) kao baznom funkcijom, potrebno je Suziti klasu baznih funkcija [3], odnosno baznu funkciju dati u obliku jednačine:

$$\Delta F = |C_1| \cdot t - \left[3 \cdot |C_1| \cdot |C_3| \cdot \left(1 - \frac{1}{1+|u|} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot t^2 + |C_3| \cdot t^3 \dots .3$$

Statističkom obradom rezultata merenja sa nekom od navedenih baznih funkcija dobija se izuzetno jaka korelativna veza između priraštaja otpora i vremena rezanja. Takođe je utvrđeno, da prevojna tačka krive priraštaja otpora neznatno odstupa od prevojne tačke krive habanja alata.

Ova analogija iskorišćena je za iznalaženje pokazatelja habanja alata na bazi priraštaja otpora rezanja.

Pored korelativne veze $\Delta F(t)$ potrebno je poznavati i oblik zavisnosti priraštaja otpora i habanja alata.

Ispitivanja izvršena u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu, pokazala su da najbolju korelaciju priraštaja otpora i habanja alata daje regresiona funkcija:

$$(\Delta F + 1) = a' \cdot EXP(a_1' \cdot h^2)$$

Takođe dobru korelaciju daju i regresiona funkcija:

$$(\Delta F + 1) = a_1 \cdot \text{EXP}(a_2' \cdot h) \equiv a_1 \cdot a_2^h \quad \dots \dots \dots \quad 4$$

koja je znatno pogodnija za postojeće razmatranje.

Logaritmovanjem jednačine (4) dobija se jednačina:

$$\ln(\Delta F + 1) = \ln a_1 + \ln a_2 \cdot h \quad \dots \dots \dots \quad 5$$

gde je sa h označen praćeni parametar habanja alata koji se prema [3] može definisati za ceo period habanja regresionom jednačinom oblike:

$$h = C_1 \cdot t + C_2 \cdot t^2 + C_3 \cdot t^3$$

Ako se izvrši regresiona analiza po jednačini (5), gde će se umesto parametra habanja uneti promenljive t, t^2 i t^3 , odnosno regresiona analiza funkcije:

$$\ln(\Delta F + 1) = \ln a_1 + \ln a_2 \cdot (c_1' \cdot t + c_2' \cdot t^2 + c_3' \cdot t^3) \quad \dots \quad 6$$

dobiće se regresiona jednačina:

$$\ln(\Delta F + 1) = a_1'' + c_1'' \cdot t + c_2'' \cdot t^2 + c_3'' \cdot t^3 \quad \dots \dots \dots \quad 7$$

gde su konstante vezane relacijama:

$$\begin{aligned} a_1'' &= \ln a_1; \quad c_1'' = \ln a_2 \cdot c_1'; \quad c_2'' = \ln a_2 \cdot c_2' \\ &\text{i } c_3'' = \ln a_2 \cdot c_3' \quad \dots \dots \dots \quad 8 \end{aligned}$$

Izraz: $\varphi(t) = c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3$

jest jednačina krive habanja pomnožena određenom nepoznatom konstantom i odgovara parametru habanja sa aspekta priraštaja praćenog komponentnog otpora rezanja. Veličina ovog parametra u prevojnoj tački krive odredena je jednačinom:

$$\varphi(t) = \frac{c_1'' \cdot c_2''}{3 \cdot c_3''} + \frac{4 \cdot c_2'' \cdot t^3}{27 \cdot c_3'' \cdot t^2} \quad \dots \dots \dots \quad 9$$

Odnos: $\varphi(t) / \varphi(t_p)$ je bezdimenzionalni pokazatelj habanja alata sa aspekta priraštaja otpora i definisan je jednačinom:

$$\begin{aligned} p(\Delta F) = p &= \frac{\varphi(t)}{\varphi(t_p)} = \frac{\ln(\Delta F + 1) - k_0}{\ln(\Delta F_p + 1) - k_0} = \dots \dots \dots \\ &= k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2 + k_3 \cdot t^3 \quad \dots \dots \dots \quad 10 \end{aligned}$$

Korišćenjem relacija (3) jednačina (10) može se napisati u obliku:

$$p \cdot (\Delta F + 1) = K_1 \cdot (t - t_p) + K_2 \cdot (t - t_p)^3 \quad \dots \dots \dots \quad 11$$

Identičan pokazatelj može se dobiti iz odnosa:

$$P(h) = \frac{h(t)}{h(t_p)}$$

gde je $h(t)$ - jednačina krive habanja; $h(t_p)$ - veličina habanja (parametra habanja) u prevojnoj tački. Ovaj pokazatelj definisan je jednačinom:

$$p(h) - 1 = K_1 \cdot (t - t_p) + K_2 \cdot (t - t_p)^3 \quad \dots \dots \dots \quad 12$$

Praćenjem priraštaja komponentnih otpora rezanja u toku vremena obrade mogu se dobiti pokazatelji $p(\Delta F_i)$, $i = 1, 2, 3$. Takođe se praćenjem jednog ili više parametra habanja mogu dobiti krive habanja alata, preko kojih se dobija pokazatelj $p(h)$, pa se poređenjem ovog pokazatelja i pokazatelja $p(\Delta F)$ može izvršiti verifikacija izloženog modela.

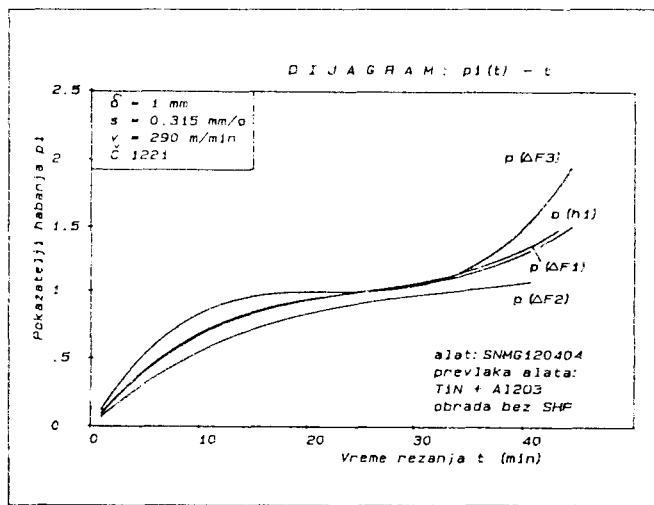
2. DIJAGRAMSKI PRIKAZI POKAZATELJA HABANJA

Statističkom obradom eksperimentalnih podataka (podaci dobijeni u obradi struganjem, bušenjem i glodanjem) dobijeno je izuzetno dobro poklapanje pokazatelja $p(\Delta F)$ i pokazatelja $p(h)$. U većini slučajeva najmanje odstupanje se dobija praćenjem priraštaja glavnog otpora rezanja $p(\Delta F_1)$. Kod operacije završne obrade struganjem, gde je habanje koncentrisano na delu radiusa vrha reznog klini dobra korelacija ovih pokazatelja može se dobiti i praćenjem priraštaja otpora prodiranja $p(\Delta F_2)$.

Verifikacija datog modela vršena je preko krivih habanja. Kao parametri pohabanosti alata praćene su veličine:

h_s - srednja širina pojasa habanja na lednoj površini reznog klini; h_1, h_2, h_3 - dužina žlebova koncentrisanog habanja na prelaznom sečivu [2]; h_r - liniski parametar habanja kod spiralne burgije (habanje na prelazu cilindričnog u konusni deo ledne površine).

Uporedni prikaz pokazatelja habanja $p(\Delta F)$ i $p(h)$ dat je na slikama br. 1 do 5, dok su jednačine regresije i ostali statistički pokazatelji pouzdanosti dobijenih rezultata izostavljeni zbog obimnosti rada.

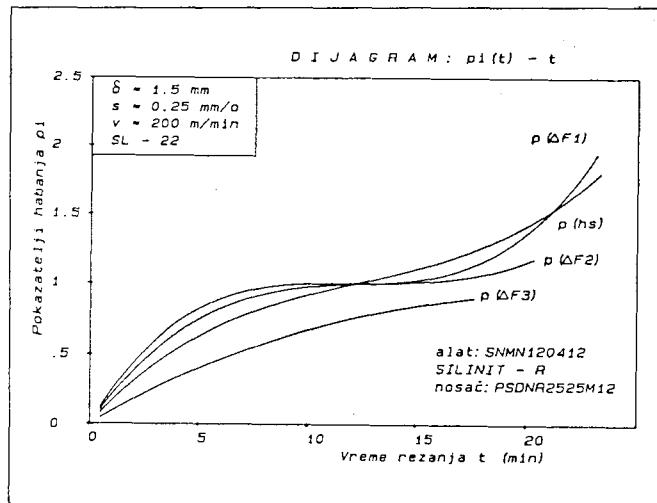


Slika 1.

Komplentna statistička obrada izvršena je posredstvom odgovarajućih računskih programa regresione analize. Krive na dijagramima crtane su posredstvom posebnog računarskog programa na bazi regresionih jednačina (11) i (12).

3. RAZMATRANJE MOGUĆNOSTI DEFINISANJA POSTOJANOSTI ALATA PREKO IZVEDENOG POKAZATELJA HABANJA

Koristeći krivu habanja definisanu jednim jednačinom za ceo period habanja alata [3] dolazi se do jednačine krive otpornosti alata na habanje.



Slika 2.

Korišćenjem krive otpornosti, moguće je integraljenjem do određenog nivoa pohabanosti odrediti postojanost alata. Ovaj način određivanja postojanosti alata ima izuzetnu važnost sa aspekta vremena ispitivanja i pouzdanosti dobijenih rezultata.

Cilj predstojećih razmatranja je definisanje izraza iz kojeg se postojanost alata može odrediti integraljenjem funkcije priroštaja otpora do određenog nivoa pokazatelja habanja $p(\Delta F)$.

Uvođenjem smene koordinata: $P(\Delta F) = p(\Delta F) - I$ i $T = t - t_p$ u jednačinu (11) dobija se jednačina:

$$P = P(\Delta F) = K_1 \cdot T + K_2 \cdot T^3 = T \cdot (K_1 + K_2 \cdot T^2) \quad 13$$

Diferenciranjem jednačine (13) po vremenu T dobija se jednačina:

$$I_f = \frac{dP}{dT} = K_1 + 3 \cdot K_2 \cdot T^2 \quad 14$$

iz koje slede veličine:

$$T^2 = \frac{I_f - K_1}{3 \cdot K_2} \quad T = \left[\frac{I_f - K_1}{3 \cdot K_2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Zamenom vrednosti za T i T^2 u jednačini (13) dolazi se do jednačine:

$$P = \left[\frac{I_f - K_1}{3 \cdot K_2} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{2K_1 + I_f}{3}$$

odnosno posle kvadriranja:

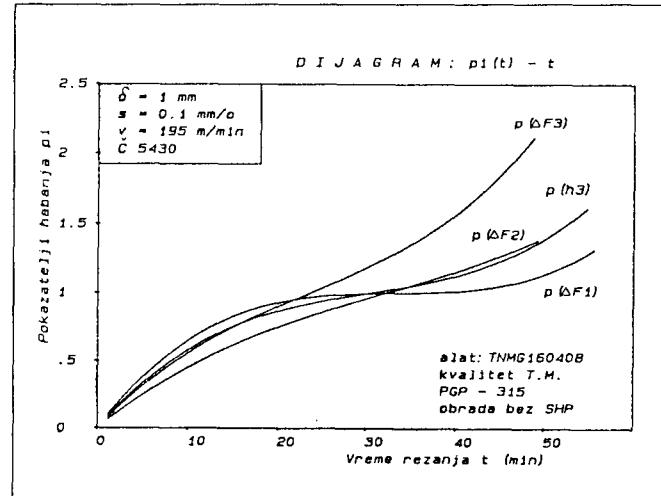
$$27 \cdot P^2 \cdot K_2 = (I_f - K_1) \cdot (2 \cdot K_1 + I_f)^2 \quad 15$$

Diferenciranjem jednačine (15) po pokazatelju P , uz korišćenje veze izvoda:

$$\frac{dI_f}{dP} = \frac{d}{dP} \left(\frac{dP}{dT} \right) = \frac{d}{dP} \left(\frac{1}{dT} \right) = \frac{d}{dP} \left(\frac{1}{R_f} \right) = - \frac{1}{R_f^2} \cdot \frac{dR_f}{dP}$$

i poznatih odnosa: $I_f = 1 / R_f$, $K_1 = I_p = 1 / R_p$, dolazi se do diferencijalne jednačine:

$$54 \cdot P \cdot K_2 \cdot dP \cdot \frac{3}{R_f} \cdot \left(\frac{2}{R_p} + \frac{1}{R_f} \right) \cdot \left(\frac{-1}{R_f^2} \right) \cdot dR_f \quad 16$$



Slika 3.

Opšte rešenje ove jednačine dano je izrazom:

$$9 \cdot P^2 \cdot K_2 = \left(\frac{1}{R_p \cdot R_f} \right) + \left(\frac{1}{3 \cdot R_f^3} \right) + C \quad 17$$

Integraciona konstanta C određuje se iz početnih uslova:

$$P = 0 \Rightarrow R_f = R_p \Rightarrow C = -4 / 3 R_p^3$$

Zamenom vrednosti C u jednačini (17) uz korišćenje veze: $P = p - I$, dobija se jednačina:

$$(p - 1)^2 = \frac{3 \cdot R_p^2 \cdot R_f + R_p^3 - 4 \cdot R_f^3}{27 \cdot R_p^3 \cdot K_2 \cdot R_f^3}$$

koja se može napisati u obliku:

$$R_f^3 + \left(\frac{-3 \cdot R_p^2}{27 \cdot R_p^3 \cdot K_2 \cdot (p - 1)^2 + 4} \right) \cdot R + \left(\frac{-R_p^3}{27 \cdot R_p^3 \cdot K_2 \cdot (p - 1)^2 + 4} \right) = 0 \quad 18)$$

Sa druge strane (jednačina (10)) pokazatelj p određen je jednačinom:

$$p = \frac{\ln(\Delta F + 1) - k_0}{\ln(\Delta F_p + 1) - k_0}$$

iz koje se korišćenjem veza:

$$R_t = dT/dp; \quad dP = dp; \quad dT = dt; \quad R_f = dt/dp,$$

može odrediti veličina R_f po jednačini:

$$R_f = \frac{dt}{dp} = \frac{1}{\frac{dp}{dt}} = \left[\ln(\Delta F_p + 1) - k_0 \right] \times \\ \times (\Delta F + 1) \cdot \frac{dt}{d(\Delta F)} = C_e \cdot (\Delta F + 1) \cdot \frac{dt}{d(\Delta F)}$$

Imajući u vidu date relacije, jednačina (18) rešena po Kardanovom obrascu izražava se formulom:

$$(\Delta F + 1) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta(\Delta F)} = \frac{1}{\ln(\Delta F + 1) - k_0} \times \\ \times \left\{ \left[\left(\left(\frac{q'^2}{4} + \frac{p'^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{q'}{2} \right)^{\frac{1}{3}} + \left[- \left(\left(\frac{q'^2}{4} + \frac{p'^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{q'}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \right] \right\}$$

gde je:

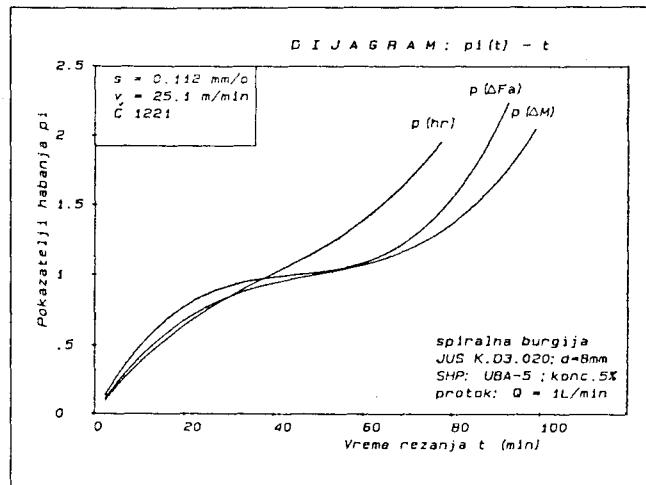
$$p' = \frac{3 \cdot R_p^2}{27 \cdot R_p^3 \cdot K_2 \cdot \left[\frac{\ln(\Delta F + 1) - k_0}{C_e} - 1 \right]^2 + 4}$$

i

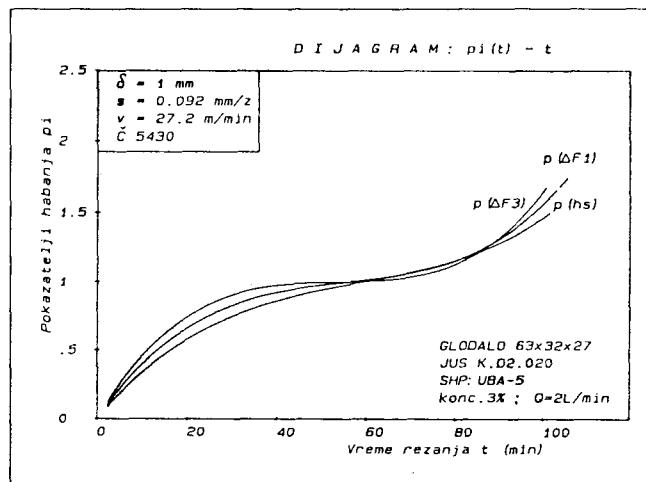
$$q' = \frac{p' \cdot R_p}{3}$$

Unošenjem eksperimentalnih vrednosti za priraštaj otpora ΔF i recipročne vrednosti brzine priraštaja otpora $\Delta(\Delta F) / \Delta t$, mogu se primenom odgovarajućih računarskih odnosno numeričkih programa odrediti veličine konstanti R_p , K_2 , k_0 i C_e . Posle određivanja konstanti moguće je integraljenjem doći do postojanosti alata. Naime, postojanost alata određuje se integralom:

$$t = \int_0^p \left\{ \left[\left(\left(\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{q_1}{2} \right)^{\frac{1}{3}} + \left[- \left(\left(\frac{q_1^2}{4} + \frac{p_1^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{q_1}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \right] \right\} \cdot dp \quad \dots \dots \dots \quad 20$$



Slika 4.



Slika 5.

gde je:

$$p_1 = f(p) = \frac{-3 \cdot R_p}{27 \cdot R_p \cdot K_2 \cdot (p-1)^2 + 4}$$

i

$$q_1 = \frac{p_1 \cdot R_p}{3}$$

Sa aspekta određivanja granica integraljenja interesantno je razmotriti sledeće vrednosti pokazatelja p .

Veličina pokazatelja p ako ima vrednost:

$p = p(\Delta F) = 0$, alat je tek počeo da reže, odnosno $h=0$ i $t=0$;

$p = p(\Delta F_p) = 1$, završen je period inicijalnog habanja i prvi deo faze ustaljenog habanja, odnosno: $h = h_p$ i $t = t_p$;

$p = p(\Delta F_k) = p_k$ pokazatelj habanja dostigao je kritičnu vrednost, odnosno $h = h_k$ i $t = t_k$.

Prema rezultatima statističke obrade podataka veličina kritičnog pokazatelja kreće se u intervalu $1 < p_k < 2$. Naime, većina praćenih alata otkazala je u ovom intervalu pokazatelja p_k .

4. ZAKLJUČAK

Teorijskim razmatranjima i analizom rezultata merenja može se zaključiti:

- Stepen pohabanosti alata može se vrlo pouzdano odrediti preko izведенog pokazatelja $p(\Delta F)$. Izvedeni pokazatelj daleko integralnije reprezentira proces habanja alata u odnosu na linijske parametre habanja [2], koje je u nekim obradama jedino i moguće pratiti. Dobro poklapanje pokazatelja $p(\Delta F)$ i pokazatelja $p(h)$ omogućava praćenje habanja bez prekida procesa obrade.
- Poznavanje samo jedne vrednosti nekog parametra habanja (recimo srednje širine pojasa habanja) može se praćenjem priraštaja otpora (jednačine 6 i 7) definisati kriva habanja alata.
- Određivanje postojanosti alata, integraljenjem funkcije priraštaja otpora ima izuzetnu važnost sa aspekta vremena ispitivanja i pouzdanosti dobijenih rezultata. Osnovne predpostavke ovog zaključka su sledeće:
 - a) U toku procesa obrade moguće je dobiti relativno veliki broj podataka o priraštaju (empirijskom) otpora i empirijskoj brzini priraštaja otpora u relativno kratkom vremenu ispitivanja.
 - b) Ulazni podaci za odgovarajuće programe regresione analize dobijaju se akvizicijom signala priraštaja otpora (AD - konvertor).
 - c) Postojanost alata dobija se integraljenjem određene funkcije priraštaja otpora.

Imajući u vidu navedene činjenice, ova metoda se može iskoristiti za definisanje indeksa obradivosti materijala sa aspekta postojanosti.

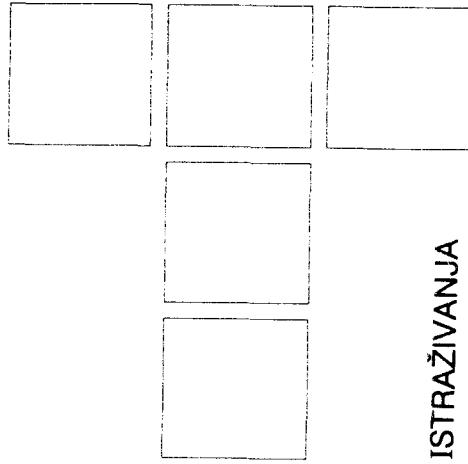
Treba naglasiti, da se primenom ovog modela može naići na niz problema tehničke prirode. Kao najveći problem treba istaći mogućnost pojave ekstremne vrednosti kod funkcije $\Delta F(t)$, kada treba preći na jednačinu (3) kao baznu funkciju korelativne veze $\Delta F(t)$. Pošto se konstante ove jednačine određuju primenom računarskih programa koji rade po metodu iteracije, vreme obrade podataka (naročito u slučaju velikog broja podataka) može biti izuzetno dugo.

LITERATURA

- [1] B. IVKOVIĆ: **Razmatranje mogućnosti određivanja obradivosti materijala merenjem otpora rezanja**, Tribologija u industriji 1/1990., Kragujevac, 1990.
- [2] J. STANIĆ: **Teorija obrade metala 1**, Mašinski fakultet, Beograd, 1986.
- [3] B. TADIĆ: **Prilog analitičkom definisanju krivih habanja**, Tribologija u industriji 4/1990., Kragujevac, 1990.
- [4] S. VUKADINOVIĆ: **Osnovi teorije verovatnoće i matematičke statistike**, Beograd, 1990.
- [5] G. MILANOVIĆ: **Numerička analiza II**, Naučna knjiga, Beograd, 1988.
- [6] B. TADIĆ, B. NEDIĆ: **Ispitivanje uticaja pohabanosti alata na veličinu otpora rezanja u obradi struganjem**, YUTRIB '89, Kragujevac, 1989.

*Da li ste
obnovili pretplatu
za 1991. godinu ?*

**Redakcija časopisa
tribologija u industriji**



Rotaciono izvlačenje konusnih delova

ISTRAŽIVANJA

1. UVOD

Rotaciono izvlačenje spada u grupu novih postupaka kojim se vrši trajna deformacija materijala. Ovim postupkom se izrađuju osnosimetrični, konusni i cilindrični elementi sa pravolinijskom i rivolinijijskom izvodnicom. Kako je pri ovome izvršena lokalizacija zone deformisanja na usko područje, to su sile koje se javljaju daleko manje u odnosu na druge postupke deformacije. Dugo vremena kod određivanja ovih sila koristile su se metode bazirane na pretpostavkama. Primenom merno - tehničkih ispitivanja, koje se zasnivaju na merenju sila tro-komponentnim piezo elementima, stvoren su uslovi za precizno određivanje njihovih vrednosti kao i za optimizaciju postupaka. Na bazi istraživanja došlo se do korelacije između: parametara obrade i veličine otpora de-

2. OSNOVNI PRINCIPI DEFORMACIJE KONUSNOG ROTACIONOG IZVLAČENJA

Sva predmetna istraživanja i definisanje postupaka izrade odnose se na radni predmet prikazan na sl. 1.

Primerak, ravna ploča ili konusni elemenat, ulaze se između trna i pridrživača 2. Na njega deluju diskovi, čiji nosač se kreće paralelno izvodnici trna, a obrtno kretanje dobijaju od radnog predmeta. Debljina zida "S" konusnog elementa i debljina "So" primerka su u funkcionalnoj zavisnosti koja odgovara sinusnom zakonu:

$$S = S_o \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

ako je primerak ravna ploča.

Materijal: AlMg3.10

$$\begin{aligned} \sigma_{0.2 \text{ min}} &= 78.5 [\text{N / min}] \\ \sigma_m \text{ min} &= 176.5 [\text{N / min}] \\ b_s \text{ min} &= 17 \% \end{aligned}$$

Hemiski sastav:

$$\begin{aligned} \text{Mg max} &= 3.5 \% ; \text{Cu max} = 0.1 \% \\ \text{Si max} &= 0.5 \% ; \text{Fe max} = 0.5 \% \\ \text{Zn max} &= 0.2 \% \end{aligned}$$

Primerak:

rondela $\phi 80 \times 3.8$
tvrdota 52 - 57 HB

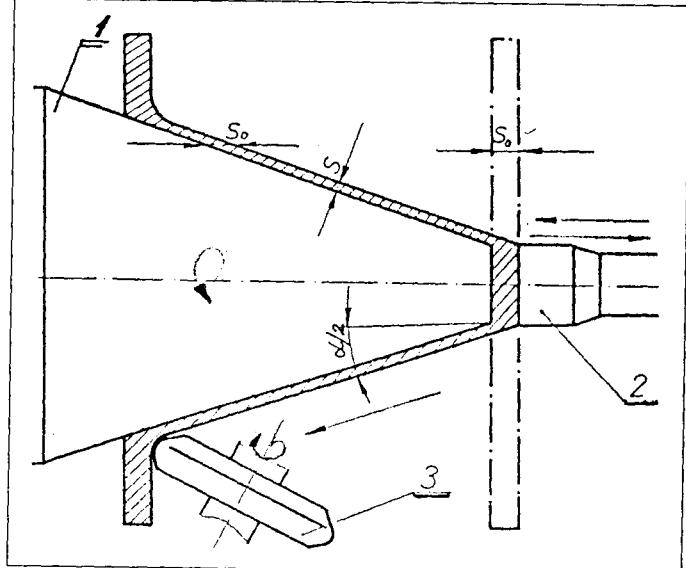
Slika 1.

formacija, stepena deformacije, mehaničkih osobina i topografije površina.

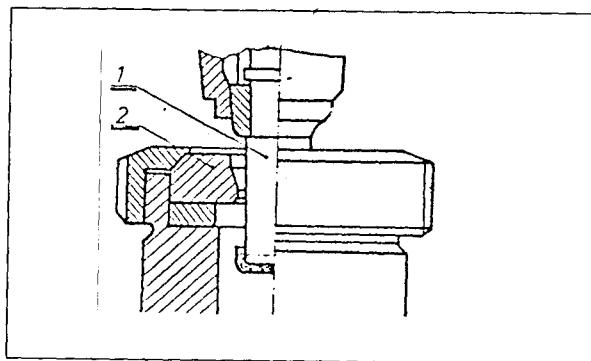
U slučaju kada je primerak konusnog oblika debljina radnog komada izračunava se po sledećem obrascu:

$$S = S_o \cdot \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}}$$

Prof. Dr Zoran Nikić, dipl. ing
Pedagoško tehnički fakultet, Čačak
Slobodan Pajević, dipl. ing
Čačak



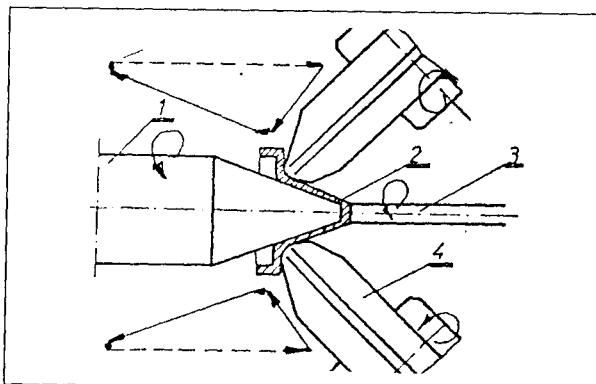
Slika 2.



► Prvo rotaciono izvlačenje

mašina: mašina za rotaciono izvlačenje
"LEICO" DW 236 CNC
radni delovi alata:

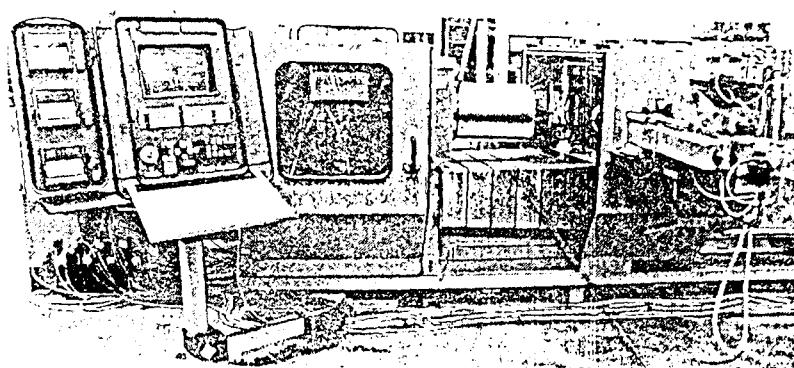
1. trn
3. pridrživač
4. disk



3. MAŠINA ZA ROTACIONO IZVLAČENJE

Pri ispitivanju korišćena je mašina "LEICO" DW 236 CNC koja je prikazana na sl. 3.

Korišćena mašina poseduje ugrađeni merni sistem za merenje sila otpora deformacije i to na bazi tro - koponentnih pijezo elemenata, firme "YOKOGAVA" tipa N° 4152. Navedeni merni sistem maštine je baždaren kod proizvodača maštine.



Slika 3.

Karakteristika maštine

max. prečnik radnog komada:	360 mm
max. dužina radnog komada:	600 mm
snaga pogona .	31 kW
max. brzina suporta:	1.8 m/min
max. broj obrtaja radnog vretena:	1500 o/min
god. proizvodnje	1989

4. POSTUPAK IZRADE KAPE

Sam postupak izrade konusne aluminijumske kape podeljen je u osam operacija i to:

► Savijanje čančeta

mašina: hidraulična presa "ROWETA" - 100 t
radni delovi alata:

1. izvlakač
2. prsten za izvlačenje

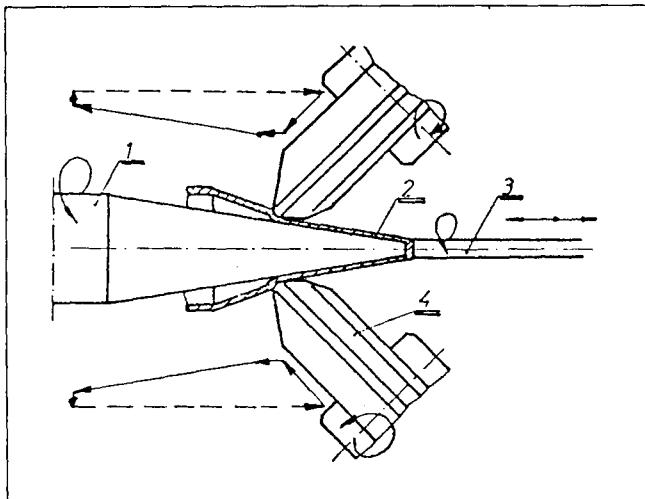
► Hemijska priprema (bajcovanje)

► Završno rotaciono izvlačenje

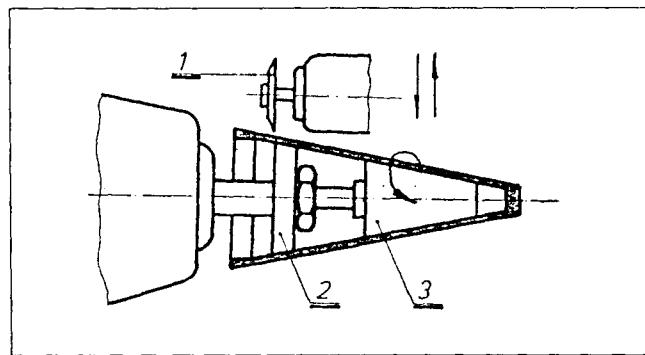
mašina: mašina za rotaciono izvlačenje
"LEICO" DW 236 CNC

radni delovi alata:

1. trn
3. pridrživač
4. disk



- Skraćivanje
mašina: doradni strug "SCHULLER"
radni delovi alata:
1. spoljašnji nož
2. unutrašnji nož
3. graničnik



- Pranje
► Kontrola
► Transport

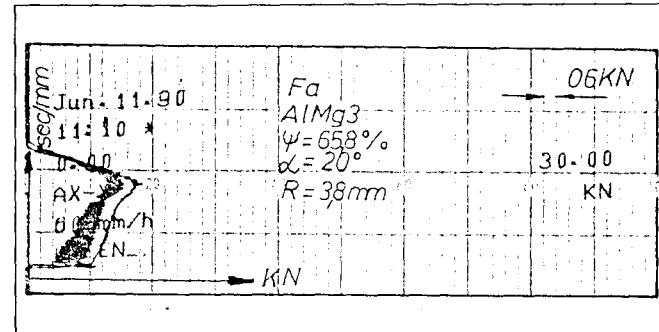
5. ISPITIVANJE OTPORA DEFORMACIJA, MEHANIČKIH OSOBINA I TOPOGRAFIJA POVRŠINE PRI ROTACIONOM IZVLAČENJU KAPE

■ Metodologija ispitivanja sila pri deformaciji

Merne ploče uređaja za merenje sila su postavljene ispod držača i omogućavaju odvojeno merenje aksijalne (F_a), radijalne (F_r) i tangencijalne (F_{ta}) sile i njihovo prikazivanje na digitalnom pokazivaču ili pisaču u boji.

Na sl. 4 dat je odsečak trake sa upisanom aksijalnom silom za prvu fazu rotacionog izvlačenja kape, gde su:

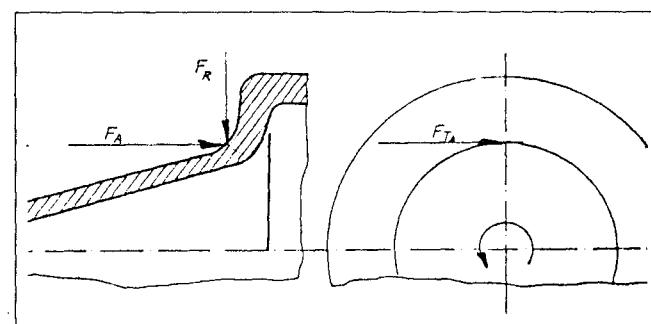
- ψ - deformacija preseka
 α - vrednost poluguščine
R - radijus diska



Slika 4.

Merenje i prikazivanje sila se vrši odvojeno za obe ose (X, Y) u različitim bojama. Ispitivanje će se izvesti za obe operacije rotacionog izvlačenja kape uz variranje šest vrednosti brzina kretanja nosača diskova (50, 100, 150, 200, 250, 300 mm/min) i dve vrednosti broja obrtaja radnog vretena (975 i 675 o/min).

Promena vrednosti sila u zavisnosti od promene tehnoloških parametara biće prikazana u vidu dijagrama. Ovde treba napomenuti da su pri svakoj vrednosti brzine i broja obrtaja radena po tri komada kape i da vrednost u dijagramu predstavljaju srednju vrednost za ova merenja očitana sa trake pisača mernog uređaja.



Sl. 5 - Delovanje sila u procesu rotacionog izvlačenja

5.1 Rezultati ispitivanja prve faze rotacionog izvlačenja

■ Vrednosti sila

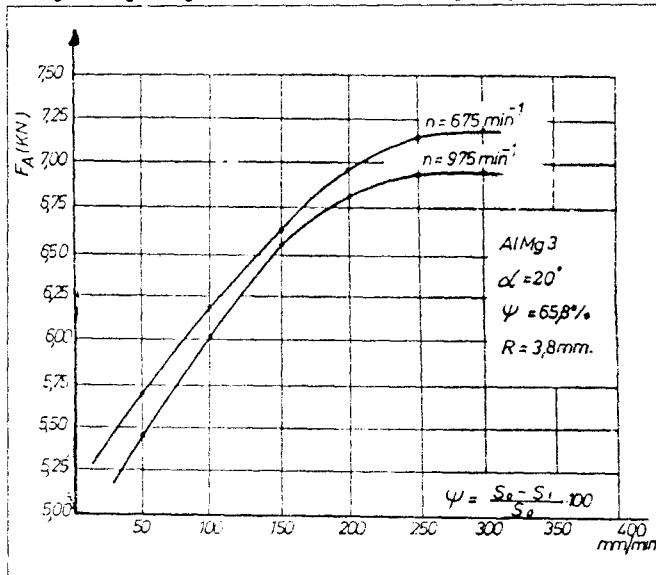
Na slikama 6, 7 i 8 prikazana je promena aksijalne, radijalne i tangencijalne sile u zavisnosti od brzine nosača diskova i broja ortaja radnog vretena.

■ Vrednosti deformacije prve faze rotacionog izvlačenja kape

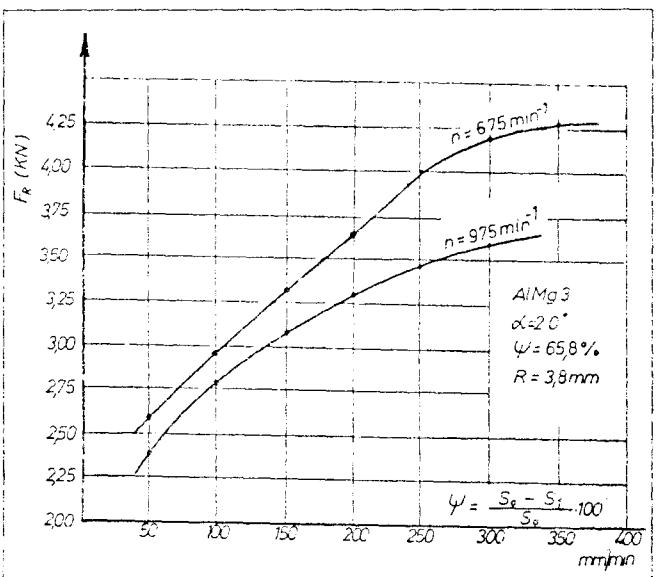
Pored merenja sila na prvoj fazi rotacionog izvlačenja kape izvršeno je merenje deformacije (zakrivljenosti osa) u zavisnosti od tehnoloških parametara. Ovo je izvedeno putem merenja zakrivljenosti osa koje su prethodno ugravirane na primerku prema sl. 9.

Sa dijagrama na sl. 11 se vidi da sa porastom brzine nosača diskova u [mm/min] raste vrednost deformacije. Poredjenjem

dijagrama na sl. 8. i 11. možemo konstatovati da se deformacija menja sa promenom vrednosti tangencijalne sile.



Sl. 6 - Promena aksijalne sile u zavisnosti od [mm/min] i [o/min]



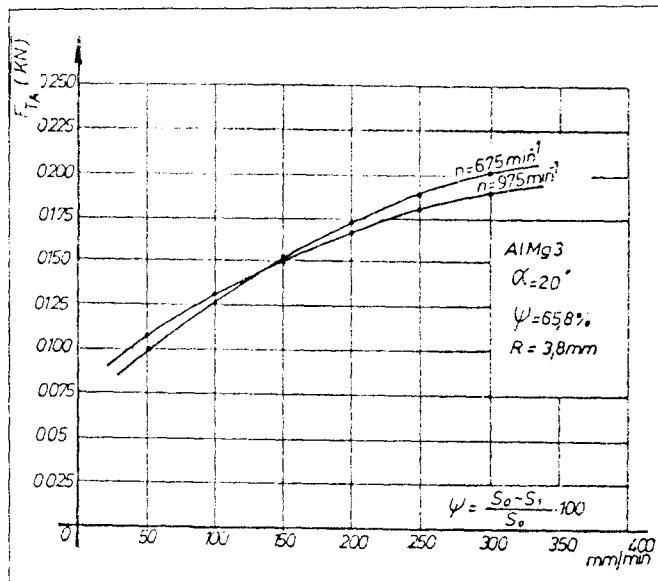
Sl. 7 - Promena radijane sile u zavisnosti od v [mm/min] i n [o/min]

■ Vrednost tvrdoće po plaštu prve faze

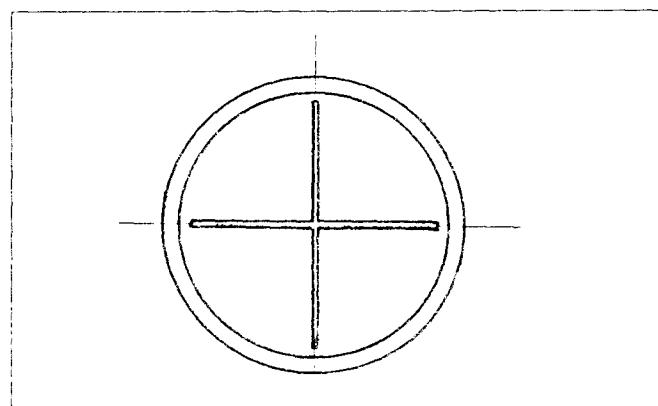
Nakon završetka prve faze rotacionog izvlačenja kape izmerena je tvrdoća po plaštu na kontrolnim mestima prema sl. 12.

Merenje tvrdoće izvršeno je na VICKERS- AMSTRONG aparatu sa kuglicom prečnika 2 mm i silom od 98.1 N u vremenu od 30 sec.

Kao što se iz tabela T. 1 i T. 2 vidi tvrdoće su ujednačene za sva tri kontrolna mesta pri svim uslovima izvođenja operacije rotacionog izvlačenja.



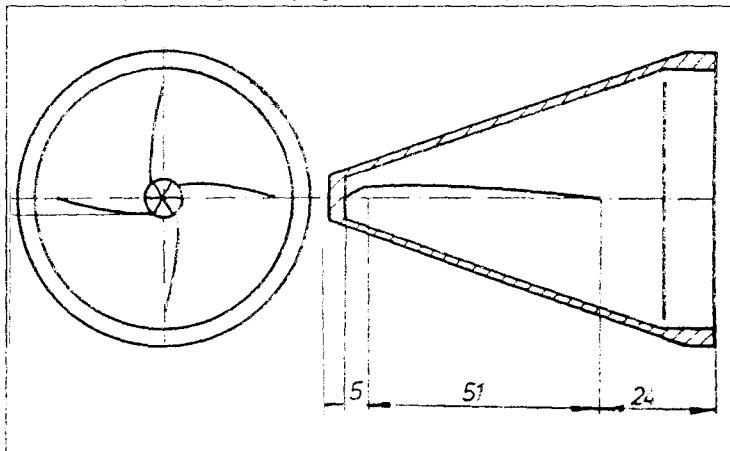
SL. 8 - Promena tangencijalne sile u zavisnosti od v [mm/min] i n [o/min]



SL. 9 - Gravura (0.5×0.15) sa unutrašnje strane primerka

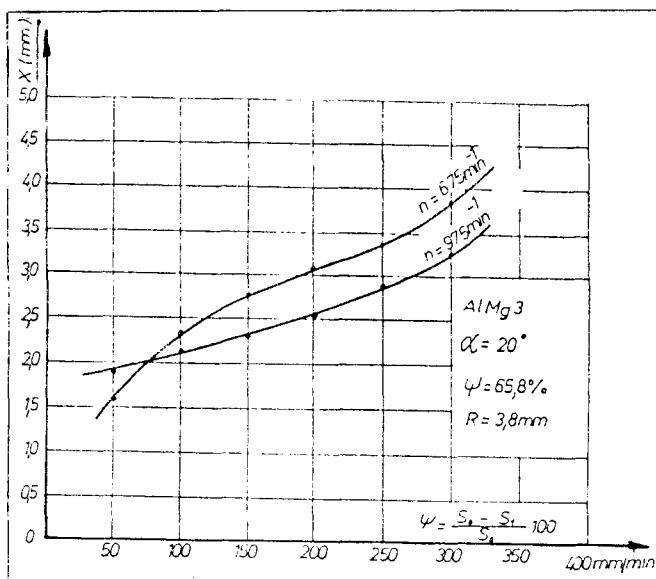
■ Merenje hrapavosti na prvoj fazi rotacionog izvlačenja

Na uzorcima prve faze, koje su radeni pod različitim uslovima, što je opisano u prethodnom tekstu, izvršeno je merenje hrapavosti spoljašnje površine aluminijumske kape. Rezultati:



SL. 10 - Zakrivljenost osa nakon rotacionog izvlačenja

tati su predstavljeni u tabelama T. 3 i T. 4. Merenje je izvršeno na rastojanju od 75 mm od vrha kape, a na dužini od 15 mm.



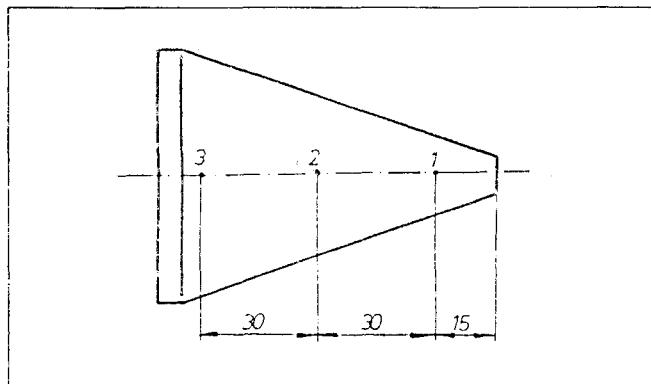
SL. 11 - Promena deformacije u zavisnosti od promene v [mm/min] i n [o/min]

T. 1 - Tvrdoća po plaštu pri $n = 975$ o/min

Redni broj	Brzina / Broj obrtaja [mm/min] / [min ⁻¹]	Tvrdoća po plaštu HB		
		1	2	3
1	50/975	90	85	90
2	100/975	90	95	90
3	150/975	90	85	90
4	200/975	95	90	90
5	250/975	80	85	85
6	300/975	95	90	90

T. 2 - Tvrdoća po plaštu pri $n = 675$ o/min

Redni broj	Brzina / Broj obrtaja [mm/min] / [min ⁻¹]	Tvrdoća po plaštu HB		
		1	2	3
1	50 / 675	95	96	95
2	100 / 675	90	95	100
3	150 / 675	90	90	95
4	200 / 675	95	90	90
5	250 / 675	95	88	95
6	300 / 675	90	85	90



SL. 12 - Položaj mernih mesta

T. 3 - Hrapavost po plaštu pri $n = 975$ o/min

Redni broj	Posmak [mm/o]	Hrapavost Ra [μm]	KVALITET
1	0.05	0.65	N6
2	0.10	0.21	N4
3	0.15	0.56	N5
4	0.205	0.59	N6
5	0.256	0.73	N6
6	0.307	0.99	N7

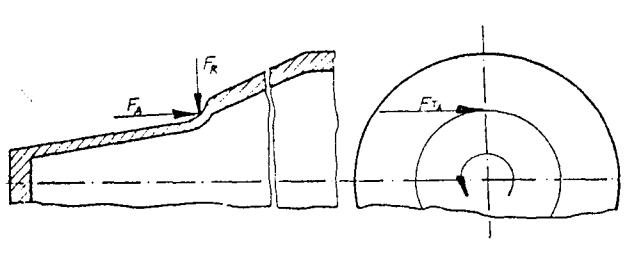
T. 4 - Hrapavost po plaštu pri $n = 675$ o/min

Redni broj	Posmak [mm/o]	Hrapavost Ra [μm]	KVALITET
1	0.074	0.32	N4
2	0.148	0.32	N4
3	0.222	0.64	N6
4	0.296	0.85	N7
5	0.370	0.73	N6
6	0.444	0.59	N6

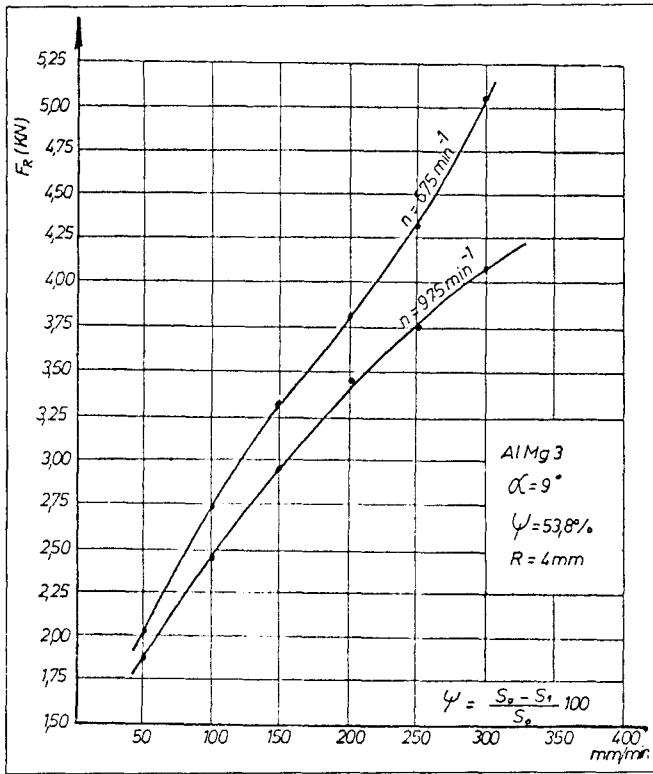
5.2 Rezultati ispitivanja završne faze rotacionog izvlačenja

■ Vrednosti sile

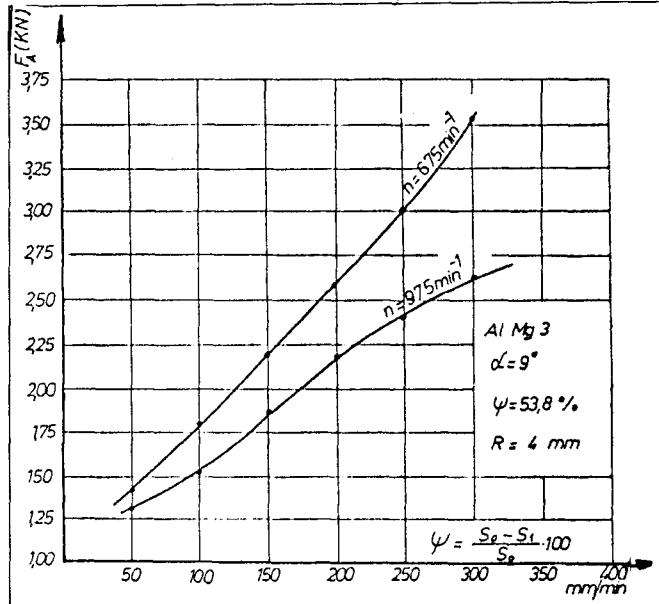
Merenje sile izvršeno je i na završnoj fazi rotacionog izvlačenja aluminijumske kape uz isto variranje tehnoloških parametara kao kod prve faze rotacionog izvlačenja.



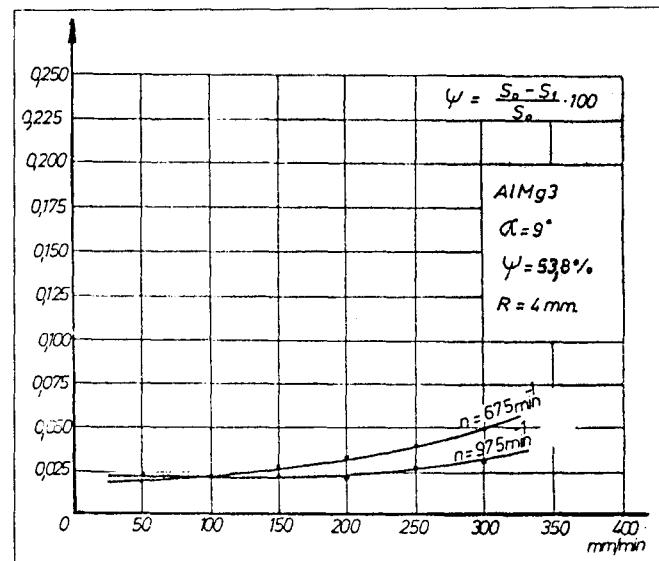
SL. 13 - Delovanje sila u procesu rotacionog izvlačenja



SL. 15 - Promena radijalne sile u zavisnosti od $v \text{ [mm/min]}$ i $n \text{ [o/min]}$



SL. 14 - Promena aksijalne sile u zavisnosti od $v \text{ [mm/min]}$ i $n \text{ [o/min]}$

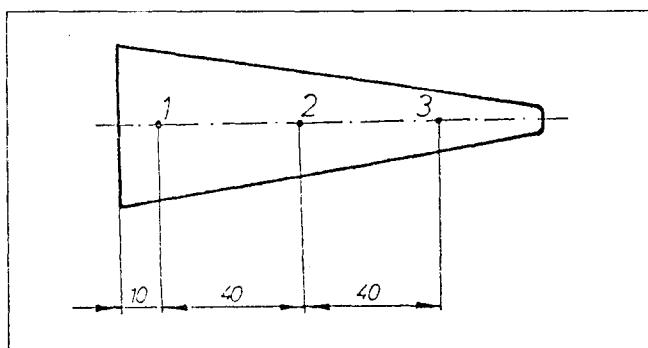


SL. 16 - Promena tangencijalne sile u zavisnosti od $v \text{ [mm/min]}$ i $n \text{ [o/min]}$

■ Vrednosti tvrdoće po plaštu završne faze

Nakon završene faze rotacionog izvlačenja izmerena je tvrdoća po plaštu na kontrolnim mestima 1, 2 i 3 čiji je položaj dat na sl. 17.

Vrednosti tvrdoće dati su u tab. T. 5 i T. 6



SL. 17

■ Merenje hrapavosti na završnoj faz. rotacionog izvlačenja

Na uzorcima završne faze, izvršeno je merenje hrapavosti po spoljašnjoj površini plašta i to na aparatu "PERTHEM" C 5D sa ispisivanjem vrednosti na traci. Vrednosti su prikazane u tabelama T. 7 i T. 8.

Merenje je izvršeno na rastojanju 75 mm od vrha kape, na dužini 15 mm od vrha kpe. Sa unutrašnje strane kape kvalitet površine je na nivou kvaliteta N 3.

Na sl. 18 dat je pregled promene valovitosti u zavisnosti od promene brzine kretanja nosača diskova na završnoj fazi

rotacionog izvlačenja kape. Proba je uradena pod sledećim uslovima:

$n = 975 \text{ o/min}$

$\psi = 53.8 \%$

$P = 4 \text{ mm}$

T. 5 - Tvrdoća po plaštu pri $n = 975 \text{ o/min}$

Redni broj	Brzina / Broj obrtaja [mm/min] / [min ⁻¹]	Tvrdoća po plaštu HB		
		1	2	3
1	50 / 975	97	97	100
2	100 / 975	97	97	95
3	150 / 975	95	97	105
4	200 / 975	95	95	105
5	250 / 975	105	97	95
6	300 / 975	105	105	105

T. 6 - Tvrdoća po plaštu pri $n = 675 \text{ o/min}$

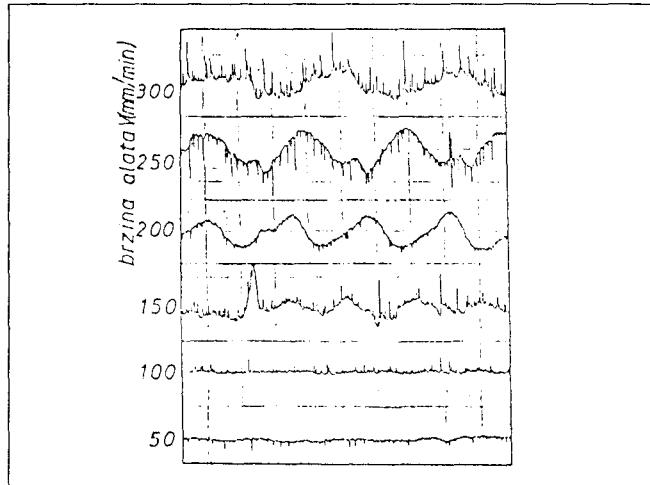
Redni broj	Brzina / Broj obrtaja [mm/min] / [min ⁻¹]	Tvrdoća po plašti HB		
		1	2	3
1	50/675	97	97	97
2	100/675	105	97	105
3	150/675	95	95	105
4	200/675	105	97	100
5	250/675	105	100	97
6	300/675	105	100	97

T. 7 - Hrapavost po plaštu pri $n = 975 \text{ o/min}$

Redni broj	Posmak [mm / o]	Hrapavost Ra [μm]	KVALITET
1	0.05	0.27	N4
2	0.10	0.23	N4
3	0.15	0.54	N5
4	0.205	0.72	N6
5	0.256	0.78	N6
6	0.307	0.61	N6

T. 8 - Hrapavost po plaštu pri $n = 675 \text{ o/min}$

Redni broj	Posmak [mm / o]	Hrapavost Ra [μm]	KVALITET
1	0.074	0.12	N3
2	0.148	0.23	N4
3	0.222	0.72	N6
4	0.296	0.70	N6
5	0.370	0.33	N4
6	0.444	0.83	N6



SL. 18

6. ZAKLJUČAK

Postupak konusnog rotacionog izvlačenja ima komparativne prednosti u odnosu na klasično duboko izvlačenje. Te prednosti se ogledaju u:

- jednostavnijem postupku izrade
- nižoj ceni alata
- kraćem vremenu pripreme
- kraćem vremenu izrade
- manjem utrošku materijala

Sa druge strane cena proizvodne mašine je veća u odnosu na klasičnu ali pri uslovima visokog stepena iskorišćenja mašine, uz naglašenu fleksibilnost pri pripremi i izradi različitih proizvoda. U uslovima maloserijske proizvodnje, uticaj troškova koji se odnose na mašinu su znatno niži od troškova pri klasičnoj proizvodnji.

Na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja uticaja parametara obrade na otpore deformacija, stepene deformacije (zakrivljenost osa), mehaničke karakteristike i topografiju površine, možemo doneti sledeće zaključke:

- Vrednost aksijalne sile (F_a), radijalne (F_r) i tangencijalne (F_{ta}) sile se povećavaju sa povećanjem vrednosti i posmaka [mm/o].
- Kod prve faze rotacionog izvlačenja, gde je primerak ravna ploča, najviše vrednosti dostiže aksijalna sila, a najmanje tangencijalna.
- Kod završne faze rotacionog izvlačenja, gde je primerak konusnog oblika, najviše vrednosti dostiže radijalna sila zatim aksijalna, a potom tangencijalna sila.
- Deformacija (zakriviljenost osa) se povećava sa povećanjem vrednosti posmaka [mm/o] i srazmerna je promeni tangencijalne sile.
- Tvrdoča kape dostiže vrlo visoke vrednosti, bliske maksimalnim za ovu vrstu materijala ($AlMg3$) i ne zavisi od posmaka.
- Hrapavost i valovitost spoljašnje površine radnog komada za niže vrednosti posmaka dostiže kvalitet ravan poliranom, dok je za više vrednosti posmaka izraženija valovitost.
- Kvalitet unutrašnje površine radnog komada jednak je kvalitetu polirane površine i to pri svim vrednostima parametara obrade.

LITERATURA

- [1] S. KALPAKCIOLU: **On The Mechanics Of Shear Spinning** - Journal of Engineering for Industry 1961. god.
- [2] M. BRUN: **Le fluotournage et analyse de propriétés des métalux fluotournés sur quelques pièces industrielles** - Memorijal de l'artillerie tom 49 1975. god.
- [3] B. MUSAFIJA: **Obrada metala plastičnom deformacijom** - IP "Svetlost" Sarajevo 1976. god.
- [4] S. KALPAKCIOLU: **A Study Of Shear Spinnability Of Metal** - Jurnal of Engineering for Industry 1961. god.
- [5] S. KOBAJASKI, I. K. HALL, E. G. THOMSEN: **A Theory Of Shear Spinning Of Cones** - Jurnal of Engineering for Industry 1961. god.
- [6] R. L. KEGG: **A New Test Method For Determination Of Spinnability Of Metals** - Jurnal of Engineering for Industry 1961. god.