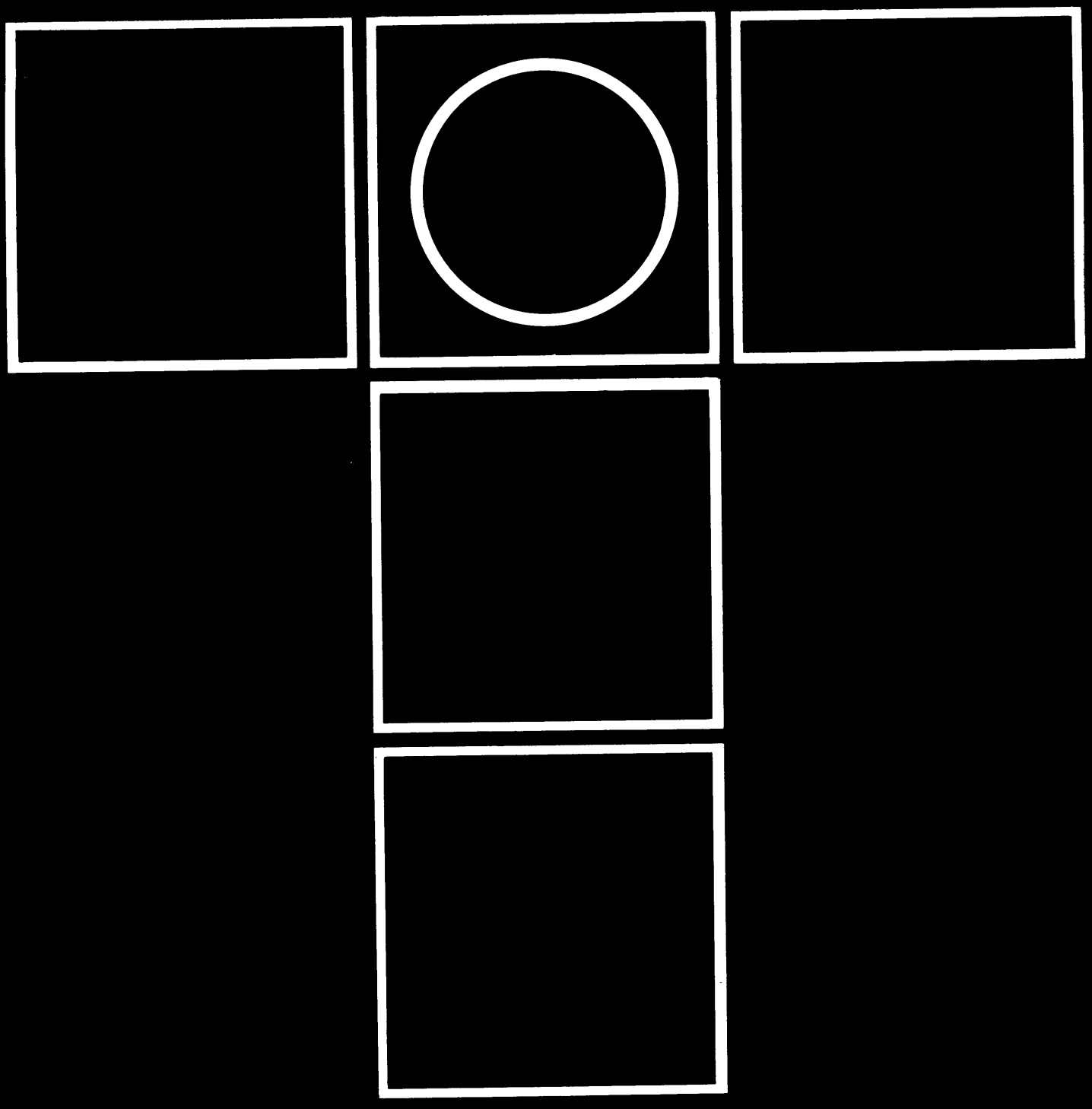
tribologija u industriji

YU ISSN 03551-1642
GODINA IX
JUNI '87.
2



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

YU ISSN 0351—1642

GODINA IX
BROJ 2
JUN 1987.

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ПЕРЕДОВИЦА

A. PAVIĆ: Tribologija u Jugoturbini - Tribology in Jugoturbina - Трибология на заводе "Юготурбина" 35

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

B. JEREMIĆ: Proces trenja pri dinamičkom opterećenju tribomehaničkog sistema - The friction process in a dynamically loaded tribomechanical system - Процесс трения при динамической нагрузке трибомеханической системы 40

R. CEBALO: Korelacija izmedju hrapavosti brušene površine kod različitih postupaka brušenja - Corelation between surface roughness in various machining procedures - Соотношение шероховатости точильной поверхности при различных способах шлифования 46

B. KRŠLJAK: Učinak tocila i vreme obrade brzoreznih čelika - The grinding wheel efficiency and machining time of high speed steel - Эффективность шлифовалного круга и время обработка быстрорежущей стали 50

ZA NEPOSREDNU PRAKSU
FOR DIRECT PRACTICE
ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННУЮ ПРАКТИКУ

M. BABIĆ: Savremeni postupci modifikovanja površina (II). 53

NOVOSTI
NEWS
ИЗВЕСТИЯ

Tribometar TR - 1 58

KNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ 60

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ 62

REZIMEA
ABSTRACTS
РЕЗЮМЕ 63

UMESTO UVODNIKA

Imajući u vidu značaj tribologije u neposrednoj praksi radnih organizacija smatrali smo da rad koji vam prezentiramo umesto uvodnika najplastičnije govori o učincima primene znanja o tribološkim procesima.

UDK 621.9.025.7.003

A. PAVIĆ

Tribologija u Jugoturbini

1.0. UVOD

Cilj ovog rada je pokušaj da se ukaže na neke bitnije tribološke probleme u Jugoturbini koji bi po svome značaju morali naći više mjesta u strategiji daljnjeg razvoja proizvoda i proizvodnje Jugoturbine. Poznato je da tribologija kao moderna i veoma važna znanost još nije potpuno sjela "pod okrilje" naših tvornica, a tribološka znanja naših stručnjaka još su dosta oskudna. Jugoturbina proizvodi energetske strojeve: brodske diesel motore, parne i plinske turbine, pumpe, razne komponente i niz drugih proizvoda. U svoje proizvode Jugoturbina ugradjuje mnogo materijala i rada. Tu se najčešće radi o specijalnim materijalima (čelicima, lijevovima, itd.) otpornih na trošenje, na visoke temperature, na agresivne medije itd. Da bi se postigla propisana otpornost na trošenje dijelova naših energetskih strojeva potrebno je izvesti niz složenih toplinskih obrada, nanošenja zaštitnih prevlaka, specijalnih obrada rezanjem, itd.

Trend razvoja energetskih strojeva ide ka povećanju svih performansi i efekata uz što veći efektivni stupanj djelovanja. Povećava se brzohodnost i specifična snaga, smanjuju se mase i gabariti, ugradjuju se sve više specijalnih teškoobradivih materijala itd. U tehnološkom smislu sve je teže obraditi i postići zadovoljavajuću točnost u proizvodnji dijelova energetskih strojeva. Tolerancije mjera postaju sve uže, a zahtjevana kvaliteta i geometrijska točnost obradjene površine postaje sve veća.

Sve navedeno govori u prilog tome da bez primjene modernih tehnologija u proizvodnji,bez primjene novih znanja iz tehnike u cjelini, ne može se u budućnosti računati na produktivnu i ekonomičnu proizvodnju. Ako se k tome doda i sve više nadolazeća automatizacija u proizvodnji primjenom kompjuterski upravljanih modernih obradnih sistema, zadatak postaje još ozbiljniji.

Od motora, turbina i pumpi traži se u eksploataciji efikasnost i sigurnost u radu, visoka pouzdanost i ekonomičnost. U proizvodnji, tj. obradi dijelova, potrebno je težiti optimalnoj kvaliteti. Bez sagledavanja triboloških aspekata u integriranom sistemu osiguranja kvaliteta u našem SOUR-u, neće se moći postići potrebni efekti - niti u proizvodnji, niti u eksploataciji naših proizvoda.

Svedoci smo čestih prijevremenih otkaza pojedinih dijelova naših motora, turbina ili pumpi zbog prijevremenih istrošenosti, zaribavanja, itd. Sve je to uzrok tribooloških procesa na tim dijelovima koji nisu išli željenim tokom, a osnovni uzrok može biti u materijalu, u termičkoj obradi, u slabom održavanju i eksploataciji itd.

Visoke temperature i pritisci pri kojima rade vitalni dijelovi motora i turbina pospješuju tribološke procese na tarućim površinama, a da bi se ti procesi usporili, potrebno je primjeniti najnovija znanja iz tribologije.

Jugoturbina raspolaže sa preko 1000 komada alatnih strojeva od kojih su najviše oni za obradu rezanjem. Na rezne alate se troše znatna sredstva a isto tako na sredstvo za hladjenje i podmazivanje pri obradi (SHP). I tu leže ogromne rezerve za sniženje proizvodnih troškova ukoliko se do kraja primjene suvremena triboloska znanja koja se odnose na obradne procese.

Dobar dio proizvoda i rezervnih dijelova Jugoturbine ugradjuje se na brodove ili upućuje u prekomorske zemlje odnosno u zemlje i područja sa povećanom vlažnošću.Tu se poduzimaju posebne mjere antikorozivne zaštite naših proizvoda. Dakle, i tu se primjenjuju triboloska znanja.

Drugim riječima, može se reći da je značaj tribologije u Jugoturbini velik i nezamjenljiv činilac kvalitete proizvoda,i to počev od konstrukcionog biroa (gdje se vrši konstrukcija i izbor materijala proizvoda, propisuje kvaliteta obrade, termička obrada, antikorozivna zaštita itd.), do proizvodnje (gdje se kroz procese obrade i mon-

taže obradjuju dijelovi i ostvaruje propisana kvaliteta), pa do eksploatacije (gdje se traži visoka pouzdanost i verificiraju sva ugradjena rješenja - što važi i za triboloska rješenja).

2.0. KARAKTERISTIČNI TRIBOLOŠKI PROBLEMI U JUGOTURBINI

2.1. D I E S E L M O T O R I

Jugoturbina proizvodi diesel motore za stacionarni i brodski pogon po licenci firmi SULZER (Švicarska) i PIELSTICK (Francuska). Tehničkom dokumentacijom davaoca licenci definirane su karakteristike kvalitete dijelova i motora u cjelini. Sam tehnološki proces nije obuhaćen licenčnom dokumentacijom što znači da se proizvodnja obavlja prema vlastitim tehnološkim rješenjima. Za razliku od turbina i pumpi, motor ima veliki broj tarućih dijelova gdje se razvijaju triboloski procesi.

a) Cilindar-klip:

Poznato je da mehanički gubici u motoru iznose 10 do 30% od indikatorske snage motora, a 60% tih gubitaka otpada na savladjivanje otpora trenja klipa i klipnih karika u cilindru motora. Odavde se vidi koliko se energije rasipa samo kod trenja klipa i karika u cilindru motora. Da bi se ovi gubici smanjili konstrukteri su poduzeli niz mjera u triboloskom smislu. Provrt košuljice cilindra (koja je od SL. 25) završno se obradjuje, u zavisnosti od vrste motora, u slijedećim kombinacijama:

a) Fino tokarenje + honovanje
b) Fino tokarenje + honovanje + mangan - fosfatiranje
c) Fino tokarenje + honovanje + nitriranje u kupki (tenifer)
d) Fino tokarenje + honovanje + tvrdo nitriranje (plinsko) za čelične košuljice brzohodnijih manjih motora.

Karike klipa su takodjer od SL . Kod većih motora kompresione karike se pobakruju radi lakšeg uhodavanja.

Klipovi se rade većinom od SL., a kod manjih motora od duraluminija. U novije vrijeme klipovi se rade iz dva dijela: donji dio je vodeći od SL, a gornji dio od čelika radi mogućnosti otvrdnjavanja utora za karike. Ovo otvrdnjavanje postiže se tvrdim kromiranjem stranica utora ili indukcionim kaljenjem.

l) Element pumpe goriva visokog pritiska:

Ovdje je triboloski par cilindar-klip, a najvažniju ulogu igra izbor odgovarajućeg para materijala. Preporučuju se kombinacije:

a) Cilindar Č.5426, cementiran i kaljen na 62 $\pm$ 2 HRc. Klip 32 CrMoV 1210 nitriran na 750 HV.
b) Cilindar Č.4734 poboljšan na 90-105 daN/mm^2, nitriran. Klip 100 Cr6 kaljen na 60 $\pm$ 2 HRc.
c) Cilindar Č.5426, cementiran i kaljen na 62 $\pm$ 2 HRc.

Najfinija obrada honovanjem i lepovanjem i visoka preciznost, to su zahtjevi na element pumpe goriva. Iskustvo pokazuje da treba uzimati čelike sa što manje zaostalog austenita jer su tada zaribavanja manja.

c) Sapnica za ubrizgavanje goriva:

Tijelo sapnice i igla čine triboloski par. Tijelo se izradjuje u dvije kombinacije:

a) nitrirano na 900 do 1000 HV
b) cementirano.

U najnovije vrijeme glava tijela sapnice sa sjedištem igle i rupicama za ubrizgavanje goriva radi se od alatnog legiranog čelika (zbog otpornosti na visoke temperature). Igla je u pravilu od brzoreznog čelika kaljena na 65 $\pm$ 1 HRc. Obrada je honovanje i lepovanje. Cilj je da troše - nje bude minimalno i da sjedište igle bude postojano.

d) Osovinica klipa:

Osovinica klipa zajedno sa svojom ležajnom čaurom čini važan triboloski par. Materijal osovinice je Cr-Ni čelik (Č.5426), tvrdoća je HRc = 61-64. Obrada je brušenje + superfiniš. Ležajna čaura je od olovne bronce uljevene u čeličnu čauru-nosač. Nema potrebnih problema u eksploataciji.

e) Osovinica klackalice ventila:

Sve je slično kao i kod osovinice klipa, dakle materijal je unificiran.

f) Usisni i ispušni ventil

Ovde se radi o dva triboloska para:

a) Tijelo ventila + vodjica
b) Pečurka ventila + sjedište u glavi motora

Ventili se izradjuju od ventilskog čelika Č.4270 oplemenjenog na 100 daN/mm^2.

Struk ventila se kromira, a na pečurku se navaruje stelit tvrdoće 60 HRc i fino brusi.

Vodjica ventila može biti od čelika kada se plinski nitrira ili od SL kada se meko nitrira.

Sjedište ventila u glavi motora izradjuje se od vatrootpornog čelika i fino brusi.

Zahvaljujući navedenim rješenjima postignut je siguran rad ventila.

g) Točkić i brijeg bregaste osovine:

Točkić vodjice podizača ventila kotrlja se po brijegu bregaste osovine i čini jedan odgovoran triboloski par. Pri radu su prisutni visoki specifični pritisci, te postoji mogućnost nastajanja utiskivanja površine točkića, odnosno brijega u vidu traga. Točkić i brijeg su od Č.5426, cementiraju se i kale na 60-64 HRc. Pri izradi u procesu finog brušenja može doći do površinskog "spaljivanja" tj. omekšavanja. Isto tako, pri cementaciji može doći do pretjeranog naugljičenja, dobije se karbidna mreža naugljičenog sloja koja je krta i puca pri radu motora. Radi uhodavanja vrši se pobakrivanje točkića.

h) Sigurnosni ventil:

Uslijed rada kod sigurnosnog ventila nastaje odredjeno utiskivanje. Bitno je sparivanje materijala vretena i kućišta ventila.

2.2. PARNE TURBINE

Kod parnih turbina postoji takodjer niz neuralgičnih mjesta gdje se razvijaju triboloski procesi i dolazi do neželjenih istrošenja. Kod kliznih ležajeva turbina troše se rukavci i antifrikcioni sloj od bijele kovine, iako su tu problemi daleko manji nego kod motora. Takodjer, uslijed mehaničkog dodira troše se labirintne brtve turbine. Regulacioni ventili takodjer se troše jer vodena para nanosi kamenac, sol itd., te se razvijaju triboloski procesi. Struk ventila se zbog toga nitrira.

Prisutno je i trošenje prigona regulatora i prigona uljne pumpe iako tu nema većih problema. Uzroci su često i lutajuće struje. Poseban problem je erozija turbinskih lopatica, posebno rotorskih kod kondenzacionih turbina većih snaga (jer je tu najveći postotak vlage u pari). Udarno djelovanje kapljica vlažne pare erodira ulazni brid lopatice. Mjere za sprečavanje erozije su aktivne (odvod dijela vlage iz vlažne pare) i pasivne (površinsko očvršćavanje ulaznog brida lopatice rotora - putem kaljenja brida, lemljenje stelitnih pločica,itd.).

Može se još spomenuti i korozivno-erozivno djelovanje vodene pare na raznim mjestima parne turbine, kao: spojevi dosjednih površina dijafragmi, kućišta, prirubnica itd. Uzrok je visok tlak i deformacija, te na taj način propuštanje vodene pare izmedju dosjednih ploha. Na primjer, na parnoj turbini u NE Krško stvorio se kanal na dosjednim plohama dubine 1 mm i širine 40 mm.

Za razliku od motora, kod parnih turbina mehanički stupanj djelovanja je znatno povoljniji i kreće se 1 do 3%. Obuhvata uglavnom gubitke zbog trenja u ležajevima i gubitke zbog pogona uljne pumpe i regulatora.

2.3. PUMPE

Kod pumpi koje Jugoturbina proizvodi za razne namjene i za transport najrazličitijih fluida, svi dijelovi nisu jednako izloženi trošenju. Uglavnom se razlikuje trošenje dijelova pumpi uslijed toplinskih i mehaničkih utjecaja, erozije zbog kemijski agresivnog, abrazivnog i kavitacionog djelovanja fluida koji se transportira. Problem trošenja je veoma značajan naročito u procesnoj industriji gdje postaje čisto limitirajućim faktorom primjene pumpi.

Na primjer: crveni mulj pri transportu glavnice,transport vode sa sadržajem pijeska, itd.

Rješenja se traže u novim materijalima, prevlakama, itd. Kod kavitacione erozije rješenja se traže optimizacijom hidrauličkih i konstrukcionih rješenja, te pogodnim izborom materijala. Mehanički stupanj djelovanja pumpe je 2 do 3%, a obuhvata: trenje u ležištima, otpore trenja sistema, brtvljenja, otpore trenja uslijed slučajnih mehaničkih dodira metalnih dijelova rotora i statora.

2.4. KLIZNI LEŽAJEVI

Za Jugoturbinu su karakteristični klizni ležajevi motora, turbina i pumpi. Od toga su u triboloskom i konstrukcionom smislu najsloženiji ležajevi motora koji rade u veoma složenim uvjetima u motoru. Osim triboloskih problema, tu su prisutni i tehnološko-metalurški problemi pri izradi samog ležaja. S obzirom da Jugoturbina ima Tvornicu kliznih ležajeva koja proizvodi te ležajeve po vlastitoj tehnologiji, postoje čvrsti razlozi da se razvoj kliznih ležajeva rasvjetli u cjelini.

U eksploataciji se nerijetko dogadja prijevremeno istrošenje ležajeva gdje uzroci mogu biti veoma različiti (uljne nečistoće, zamor materijala, kavitacija, lutajuće struje, itd.). Razvojem i primjenom suvremenih triboloških znanja kod kliznih ležajeva, ovi problemi bi se mogli znatno ublažiti.

U suradnji RO Tvornica diesel motora - FSB Zagreb, projektiran je stroj za ispitivanje ležajeva motora do promjera 400 mm. Stroj simulira rad motora u stvarnim uvjetima. U toku je priprema za izradu toga stroja.

U RO Istraživanje i razvoj, u suradnji sa proizvodnjama izradjen je stroj za ispitivanje dinamičkih svojs-

tava turbinskih ležajeva (krutost i prigušenje) koja su bitna za pouzdani rad parne turbine u eksploataciji. Slijedi instaliranje stroje. Može se reći da kod kliznih ležajeva postoje velike mogućnosti daljnjeg razvoja i primjene moderne tribologije uz maksimalnu primjenu tih istraživanja neposredno u Tvornici kliznih ležajeva, te Tvornici parnih turbina i Tvornici pumpi.

2.5. ZUPČANICI

Kvaliteta zupčanika igra važnu ulogu u pouzdanom radu motora i turbina. Postoji nekoliko tehnologija obrade zubaca zupčanika u Jugoturbini:

a) Cementiranje bokova zubaca (ili cementiranje cijelog zupčanika uz obradu naugljeničenog sloja tamo gdje zupčanik ostaje mekan). Završna obrada bokova zubaca vrši se brušenjem. Sve se izvodi u Jugoturbini.
b) Mali zupčanici kale se indukciono (izvan Jugoturbine).
c) Plameno kaljenje na 40-50 HRc. Rjedje se koristi jer je mala pouzdanost i dolazi do deformacije bokova zubaca.
d) Primjena "Terifer" postupka nitriranja zupčanika - tamo gdje traže veći pritisci pri radu. Radi se o malim zupčanicima. Operacija "Terifer" izvodi se na FSB - Zagreb.
e) Kada je riječ o zupčanicima za parne turbine radi se o velikim zupčanicima sa strelastim zubima koji se obradjuju samo poboljšanjem.

U cjelini, tribološki problemi kod zupčanika utoliko su manji, ukoliko se pravilno izvrše operacije termičke obrade i nitriranja.

2.6. ALATNI STROJEVI

Kod primjene, eksploatacije, održavanja i remonta alatnih strojeva u Jugoturbini može se susresti niz problema vezanih za primjenu tribologije. Konvencionalni otvoreni tip alatnog stroja danas se sve više zamjenjuje sa zatvorenim tipom u svrhu primjene radionalnijih principa pojedinačnog i centralnog podmazivanja kao i zbog zaštite stroja od vanjskih utjecaja i nečistoća. I pored toga što se mehanički pogoni sve više zamjenjuju sa hidrauličkim i pneumatskim, još uvijek će ostati i mehanički pogoni koji se u tom slučaju usavršavaju i povećavaju im se tribološka i druga svojstva. Naprimjer, klasično vreteno sa trapeznim navojem zamjenjuje se sa vretenom sa kuglicama, itd.

Kod kliznih staza oplemenjuje se površina radi veće otpornosti na trošenje, obavezni su zaštitni harmonikalimovi, uvodi se hidrostatsko podmazivanje pod stalnim pritiskom tako da je isključen dodir metal-metal.

Dužina rada alatnog stroja i stupanj istrošenosti ne prati se nekim sistemom, nego stroj ide na generalni remont kada ne može da postigne traženu geometrijsku tačnost pri obradi. Kod generalnog remonta istrošeni dijelovi se zamjenjuju novim ili se, ako je to moguće, tvrdo kromiraju i bruse. Radi povećanja otpornosti na trošenje,često se novi dijelovi izradjuju od kvalitetnijeg materijala. Klizne staze se glodaju, bruse i tuširaju.

U prenosnike i mjenjačke kutije se stavlja ulje koje propiše proizvodjač stroja. Kod pravilnog održavanja i eksploatacije menjačke kutije stroja izdrže 8 do 10 godina bez otvaranja.

Može se reći da postoje znatne rezerve za smanjenje istrošenja alatnih strojeva u Jugoturbini, tj. njihovog dužeg rada. Sistematskom obradom toga problema sigurno bi se došlo do rezultata koji opravdavaju primjenu tribologije i u ovom segmentu u Jugoturbini.

2.7. OBRADNI PROCESI

Veliki broj operacija obrade rezanjem ili deformacijom na preko 1000 alatnih strojeva u Jugoturbini omogućava široko polje istraživanja sa ciljem usporenja intenziteta razvoja triboloških procesa na reznim elementima alata i svim ostalim prednostima u pogledu smanjenja rashoda alata, povećanja tačnosti i kvalitete obrade itd. Današnji sistem primjene i gospodarenja sa sredstvima za hladjenje i podmazivanje (SHP) ne zadovoljava jer je "ispušten iz ruku" i ostavljen na milost ne milost OOUR-u Održavanje, tj. njegovoj službi za podmazivanje, kao i poslovodjama i radnicima u pogonima strojne obrade koji po svom nahodjenju vrše primjenu i korištenje SHP.Dakle, primjena SHP u Jugoturbini predstavlja veliko polje za znatne uštede.

U suradnji sa Mašinskim fakultetom u Kragujevcu u toku je izrada "studije za optimalnu primjenu SHP u Jugoturbini". Cilj je da se optimizira primjena SHP, izgradi nova Emulziona stanica, da se vrši regeneracija, razgradnja i ekološki tretman SHP u pogonima u Mrzlom Polju.Isto ta-o, osposobit će se Laboratorij za obradu u RO Istraživanje i razvoj radi ispitivanja triboloških karakteristika pojedinih SHP.

U narednom periodu, kada slijedi intenzivnija modernizacija u SOUR-u Jugoturbina, primjeni triboloških znanja u području obradnih procesa treba dati veći značaj. Svaki dinar uložen za rješavanje tih problema višestruko će se vratiti.

2.8. ZAŠTITA OD KOROZIJE

Ova oblast tribologije veoma je značajna za proizvodni program Jugoturbine. Na primjer, kod pumpi za procesnu industriju gdje se radi sa kiselinama, lužinama, otopinama soli i drugim kemikalijama, problem je korozija dijelova pumpi. Planira se opremanje laboratorija za ispitivanje materijala pumpi, vodova i posuda u laboratorijs - kim i pogonskim uvjetima.

U Jugoturbini se koriste razne vrste antikorozivne zaštite, odnosno razna sredstva kao: ulja, masti, boje, lakovi, razne prevlake, katodne i anodne zaštite, galvanske prevlake, itd.

Ispitivanje parametara svih tih zaštita provodit će se u Laboratoriju za ispitivanje zaštitnih prevlaka koji će se takodjer opremiti.

U Tvornici plinskih turbina opremljen je pogon za galvansku zaštitu gdje je moguće vršiti: kromiranje tvrdo, anodizaciju, niklovanje, srebrenje, fosfatiranje,elektropoliranje, kositrenje itd. Za povećanje otpornosti lopatica plinskih turbina za rad na visokim temperaturama koristi se proces aluminizacije. Pojedini dijelovi plinskih turbina zštićuju se pečenim lakovima, itd.

Provodi se i dekapiranje cijevi, otkovaka i odljevaka. Iz prethodno rečenog se može uočiti širina i raznovrsnost tehnike antikorozivne zaštite u Jugoturbini.Primjenom modernih triboloških znanja i u ovoj oblasti se mogu ostvariti velike uštede i povećati kvaliteta.

2.9. ULJA ZA PODMAZIVANJE I SHP

Radi se uglavnom o motornim uljima i uljima za podmazivanje turbina. U kemijskom laboratoriju odredjuje se viskozitet ulja, sposobnost odvajanja zraka (posebno za turbinska ulja), kiselinski i bazni broj, mehaničke nečistoće, sadržaj vode u ulju, plamište. Takodjer se vrši kontrola ulja nakon odredjenog broja sati rada motora, odnosno turbine. SHP (sredstvo za hladjenje i pod - mazivanje pri obradi) se takodjer povremeno kontrolira, ali ne sistematski kao što bi to trebalo biti.

2.10. GORIVA

Za diesel motore bitno je da se diesel gorivu mora prilagoditi ulje za podmazivanje (kompatibilnost), tj.za gorivo sa više sumpora ulje mora biti alkalnije da bi se neutralizirala kiselost koju uzrokuje sumpor u gorivu. Naime, svako gorivo sadrži nešto sumpora i pepela. Sum - por pri izgaranju djeluje negativno jer stvara kiselost, a pepeo se mješa sa uljem što loše utječe na podmazivanje. U kemijskom laboratoriju se povremeno prati i ispituje sadržaj sumpora i pepela upravo radi gore pomenutih razloga.

3.0. ZAKLJUČCI

U Jugoturbini postoje šire potrebe za razvoj i primjenu suvremenih dostignuća iz tribologije. U vezi s tim potrebno je sagledati sva područja proizvodnog ciklusa koja se odnose na tribologiju i u RO Istraživanje i razvoj i specijalizirati jedan broj stručnjaka koji će se profesionalno baviti triboloških istraživanjima i njihovom primjenom u proizvodnji. Isto tako, potrebno je kod daljnjeg razvoja laboratorija predvidjeti i nužni dio opreme za tribološka istraživanja, te uspostaviti suradnju sa znanstveno-istraživačkim institucijama u zemlji koje se bave triboloških istraživanjima.

Radi stvaranja, pogodne klime, te radi informiranja i osposobljavanja naših stručnih kadrova, potrebno je u programe permanentnog obrazovanja ugraditi teme za predavanja i seminare iz tribologije.

U cjelini gledano, primjenom triboloških znanja postoje realne šanse za smanjenje troškova obrade u proizvodnji, kao i za sigurniji i pouzdaniji rad naših proizvoda u eksploataciji.

LITERATURA

1. IVKOVIĆ, B.: Osnovi tribologije, Gradjevinska knnjiga, Beograd, 1983.
2. DIČKO M., SONIČKI N.: Površinsko kaljenje materijala - indukciono i plameno, Jugoturbina-interno, Karlovac, 1974.
3. UGARKOVIĆ R.: Izbor materijala za elemente visokotlačnih pumpi 4-taktnih motora, Jugoturbina-interno, XII-1982.
4. STANIŠA B.: Utjecaj erozije na vijek trajanja rotorskih lopatica parnih turbina. Elektroprivreda, 1985. Nr. 3/4, S.107-117.
5. Tehničko - tehnološka dokumentacija Jugoturbine.

S tribologijom se može više

ISTRAŽIVANJA

UDK 621.019.32:621.9.012

B. JEREMIĆ

Proces trenja pri dinamičkom opterećenju tribomehaničkog sistema

1. UVOD

U procesu eksploatacije kod svih tehničkih sistema za prenos snage i kretanja prisutna su dinamička opterećenja, koja u značajnoj meri utiču na njihove radne karakteristike i pouzdanost.

U nekim slučajevima dinamička opterećenja su neophodna, jer su povezana sa namenom tehničkog sistema (oscilatori, sita, transporteri, itd.). Medjutim, u većem broju slučajeva dinamička opterećenja nastaju kao posledica neuravnoteženosti pokretnih masa, prelaznih režima u eksploataciji i habanja kontaktnih elemenata.

U literaturi postoji veoma veliki broj objavljenih radova, koji se odnose na problematiku istraživanja čvrstoće elemenata izloženih dinamičkom opterećenju. Medjutim, kada su u pitanju istraživanja razvoja triboloških procesa pri dinamičkom opterećenju, može se reći da je ova oblast skoro potpuno neistražena. Samo oko 2% od ukupnog broja publikovanih istraživanja u ovoj oblasti izvedeno je sa uzimanjem u obzir dinamičkih režima opterećenja tribomehaničkog sistema.

Može se reći da rezultate istraživanja razvoja triboloških procesa pri statičkom opterećenju treba smatrati idealizovanim. Ovo je tim pre tačno ako se zna da svi realni tribomehanički sistemi ostvaruju svoje funkcije u dinamičkom režimu eksploatacije. Zbog toga je primena statičkog opterećenja kod istraživanja razvoja triboloških procesa u laboratoriji jedan od osnovnih razloga za neslaganje sa rezultatima dobijenim u eksploatacionim uslovima.

Teorijska i eksperimentalna istraživanja sa velikim brojem podataka ukazuju na to da proces trenja ima dinamičku prirodu, pa otuda i sila trenja u principu ima slučajni oscilujući karakter |1, 2, 3|.

Do sada postavljeni modeli u opštoj teoriji trenja, koji definišu mehanizme u zoni kontakta, nedovoljno su uzeli u obzir dinamičnost i slučajnost kao važnu i karakterišuću veličinu triboloških procesa.

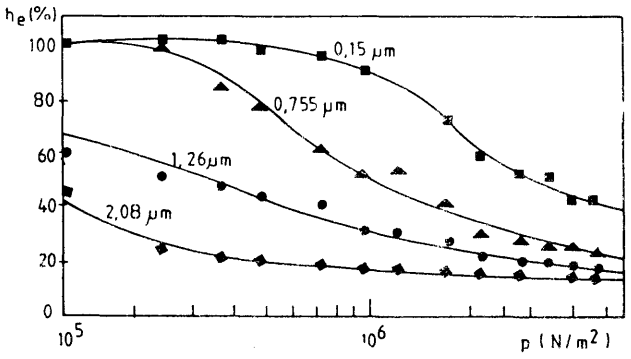
Današnji nivo saznanja prema |4| ukazuje da za razjašnjenje pojava pri trenju postoje tri glavna elementa koja treba sagledati i to:

- prirodu i čvrstoću veza obrazovanih u zoni kontakta,
- stvarnu površinu kontakta i
- mogućnosti i način razaranja materijala oko i u zoni kontakta pri relativnom kretanju kontaktnih elemenata.

Navedeni elementi stoje u odredjenim uzročnim vezama i izmedju njih se ne može postaviti oštra granica.

2. KARAKTERISTIKE KONTAKTNE ZONE

Pod uticajem spoljašnjeg opterećenja, u zoni kontakta zbog diskretne prirode kontakta, dolazi do prodiranja ili deformisanja pojedinih vrhova neravnina. Ove deformacije dovode do promene topografije kontaktnih površina.



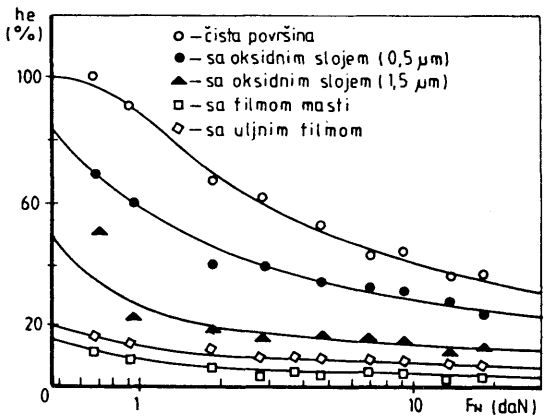
Sl. 1. - Stepen elastičnog deformisanja u zavisnosti od nominalnog pritiska pri različitim vrednostima parametra hrapavosti (Ra) kontaktnih površina |5|

Deformaciono stanje u zoni kontakta zavisi od karakteristika elemenata tribomehaničkog sistema i u najvećoj meri od specifičnosti topografije kontaktnih površina.

Sa aspekta dinamičkog opterećenja tribomehaničkog sistema, jedna od najznačajnijih karakteristika kontaktne zone je njena krutost. Način obrade, odnosno topografija kontaktnih površina je od suštinskog značaja za razvoj triboloških procesa a posebno sa aspekta krutosti kontaktne zone i njene povezanosti sa dinamičkim opterećenjem tribomehaničkog sistema.

Rezultati sa sl. 1 ukazuju na to da su na kontaktnim površinama sa manjom hrapavošću (R_a = 0,15 μm) prisutnije elastične deformacije. Kod površina sa većom hrapavošću (R_a = 2,08 μm) oblast elastičnog deformisanja je znatno manja i presudno je plastično deformisanje mikroneravnina u širokom dijapazonu nominalnog opterećenja. Navedeni rezultati su dobijeni bez prisustva maziva.

Procesi koji se odvijaju u zoni kontakta pod delovanjem spoljašnjeg (statičkog ili dinamičkog) opterećenja u mnogome zavise od prirode spoljašnjeg sloja. Prema istraživanjima |6|, prisutni spoljašnji sloj i njegova priroda bitno utiču na deformacije u zoni kontakta sl. 2. Rezultati prikazani na sl. 2 dobijeni su pri statičkom opterećenju brušenih kontaktnih elemenata (R_a = 0,12 μm) od čelika.



Sl. 2. – Zavisnost izmedju elastičnog deformisanja u zoni kontakta i normalnog opterećenja |6|

Najmanja elastičnost u zoni kontakta je dobijena kada je glavna komponenta spoljašnjeg sloja film masti. Ovo je posebno interesantno sa aspekta ostvarivanja kontakta u uslovima dinamičkog opterećenja tribomehaničkog sistema.

3. DINAMIČKO OPTEREĆENJE U ZONI KONTAKTA

Razvoj triboloških procesa pri dinamičkom opterećenju je posledica prirode defekata koje ova opterećenja inteziviraju u zoni kontakta (akumulacija dislokacija, pojava i razvoj mikro pukotina, odvajanje čestica kao produkata habanja, itd.). Na intenzitet habanja i veličinu koeficijenta trenja ne utiče samo pravac delovanja dinamičkog opterećenja u zoni kontakta. Od presudnog značaja su karakteristike ovih opterećenja, odnosno veličina amplitude i učestanosti.

Na osnovu sadašnjih saznanja utvrdjeno je da izmedju trenja i oscilovanja postoji dvostruka veza tj. trenje pobudjuje oscilovanja različitih vrsta a oscilovanje po svojoj prirodi utiče na trenje. Drugi veoma važan faktor je interakcija tribomehaničkog sistema i tehničkog sistema kome on pripada. Ako se ovome doda i činjenica o postojanju različitih krutosti kontaktne zone u ravni klizanja i ravni upravnoj na nju, tada je evidentno da se pri delovanju prinudnih dinamičkih sila upravnih na nominalnu površinu kontakta javljaju i oscilovanja u ravni klizanja. Povezanost ovih oscilovanja u dve upravne ravni najviše zavisi od prirode ostvarenih kontakata |7, 8|. Kod razmatranja uticaja dinamičkog opterećenja na razvoj triboloških procesa polazi se od sledećih činjenica.

Krutost kontaktnih elemenata u pravcu upravnom na ravan klizanja je neuporedivo veća u odnosu na krutost kontaktne zone. Tako se klizač u prvom približenju može posmatrati kao idealno kruto telo oslonjeno na mikroopruge, kojima se modeliraju neravnine kontaktne površine. Zbog prirode topografije kontaktnih površina, samo odredjeni deo mikroneravnina se nalazi u kontaktu. Bilo kakav slučajni impuls sile koji ostvari svoje trenutno delovanje na klizač (u pravcu upravnom na nominalnu površinu kontakta) izaziva slobodno oscilovanje. Ta oscilovanja su nelinearna i asimetrična |8, 9|. Kod približenja kontaktnih elemenata dolazi do promene krutosti kontaktne zone tako da ona nije konstantna veličina. Sa približenjem kontaktnih elemenata krutost se povećava, a kod udaljavanja smanjuje. Pri tome rast amplitude takvih oscilovanja dovodi do povećanja srednjeg nivoa rastojanja kontaktnih površina, a samim tim i smanjenja realne površine kontakta. Navedena pojava ima bitan uticaj na veličinu koeficijenta trenja.

Promena krutosti kontaktne zone dovodi do promena sopstvenih učestanosti oscilovanja f_o, a samim tim i uslova ostvarivanja kontakta, odnosno sile i koeficijenta trenja.

$$f_o = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C_k}{m}} \qquad (1)$$

Navedene oznake su:

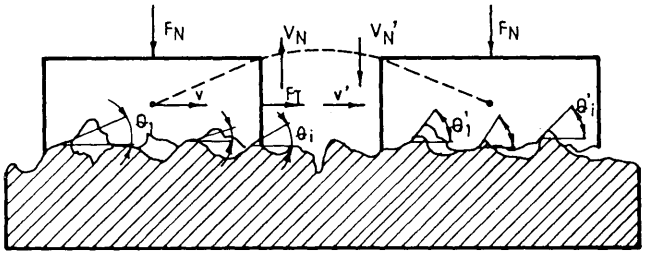
f_o - sopstvena učestanost oscilovanja klizača opterećenog dinamičkom silom

C_k - koeficijent krutosti kontaktne zone

m - masa klizača

Kako su krutosti kontaktne zone različite u ravni klizanja (C_{KT}) i ravni upravnoj na nju (C_{KN}) otuda i postojanje različitih sopstvenih učestanosti oscilovanja u ova dva upravna pravca.

Oscilovanje kontaktnih elemenata ne mora biti izazvano samo prisustvom spoljašnjeg dinamičkog opterećenja. Tako prema |10| zbog obrazovanja i razaranja molekularnih veza dolazi do promene ravnotežnih uslova. Nastajanje ovakvih procesa i uticaj topografije kontaktnih površina dovode do elementarnih kosih udara, odnosno oscilatornog procesa, sl. 3.



Sl. 3. - Trenje tvrdih tela sa mikroudarima |10|

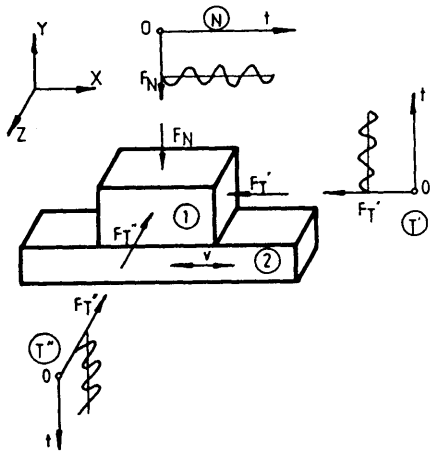
Na osnovu napred rečenog sledi da se dinamičko opterećenje u zoni kontakta javlja kao posledica spoljaš - njih prinudnih dinamičkih sila i interakcije elemenata tribomehaničkog sistema.

4. PRINUDNE OSCILACIJE NA KONTAKTNIM ELEMENTIMA

U zavisnosti od pravca delovanja, ove oscilacije mogu biti normalne (N) i tangencijalne (T',T'') - sl. 4.

Normalne prinudne oscilacije deluju upravno na nominalnu površinu kontakta i poklapaju se sa pravcem delovanja normalne sile F_N. U realnim tribomehaničkim sistemima uvek je prisutno konstantno statičko opterećenje oko koga osciluje dinamička komponenta promenljive amplitude i učestanosti.

Tangencijalne prinudne oscilacije kod ravnih kontaktnih površina se odvijaju u ravni klizanja. Njihova ekstremna dva slučaja delovanja su: u pravcu brzine klizanja (T') ili upravnom na njega (T'').

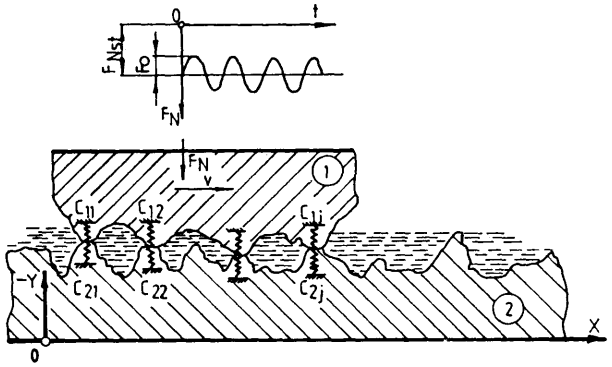


Sl. 4. - Pravci delovanja prinudnih oscilacija

5. UTICAJ PRINUDNIH OSCILACIJA NA PROCES TRENJA

Mehanizam smanjenja sile trenja kod prinudnih normalnih oscilacija povezan je sa asimetrijom oscilovanja i silama inercije |9, 11|.

Pri brzinama klizanja većim od neke kritične vrednosti, sile inercije ne pokazuju značajniji uticaj na promenu sile trenja |7, 9|. U takvim slučajevima smanjenja sile trenja je prouzrokovano samo asimetričnim kontaktnim oscilovanjem. Da bi se objasnila ova pojava treba poći od sl. 5.



Sl. 5. - Šema ostvarivanja kontakta

Svaka od neravnina ima svoju krutost, čije su vrednosti za kontaktni element (1) $c_{11}, c_{12},\ldots, c_{1i}$, a za element (2) $c_{21}, c_{22},\ldots,c_{2j}$. Zbog statističke prirode topografije, vrednosti krutosti takodje pripadaju statističkom skupu. Zavisnost normalnog opterećenja od kontaktnih deformacija može se predstaviti u obliku |9, 10|:

$$F_N = K_1^* y + K_2^* y^2 - K_3^* y^3 \qquad (2)$$

Navedena zavisnost je nelinearna i zato će oscilacije uslovljene promenljivom krutošću kontaktne zone biti asimetrične. Posmatrano za jednu periodu oscilovanja ovo dovodi do promene srednjeg rastojanja kontaktnih površina.

Na nelinearnost veze izmedju normalne sile i deformacija upućuju rezultati sa sl. 1. Treba napomenuti da krutost kontaktne zone u velikoj meri zavisi i od karakteristika kontaktnog sloja (sl. 2).

Prema sl. 5 dinamička komponenta opterećenja može se opisati jednačinom:

$$F_{Nd} = F_o . cos\omega t \qquad (3)$$

Tako je ukupna sila normalnog opterećenja sastavljena od statičke i dinamičke komponente:

$$F_N = F_{Nst} + F_{Nd} \qquad (4)$$

odnosno:

$$F_N = F_{Nst} + F_o cos\omega t \qquad (5)$$

Kako je kod realnih tribomehaničkih sistema skoro uvek prisutno da je amplituda dinamičkog opterećenja daleko manja od statičkog opterećenja tj. $F_o << F_{Nst}$, to znači da poremećajne dinamičke sile ne dovode do potpunog razdvajanja kontaktnih elemenata.

Osnovna jednačina za oscilovanje elementa mase uz prisustvo dinamičke sile sa uzimanjem u obzir krutosti kontaktne zone ima oblik:

$$\ddot{y} + \omega_o^2 y + 2\lambda\dot{y} = f_o cos\omega t - \alpha y^2 + \beta y^3 \qquad (6)$$

pri tome su:

$$\omega_o = \frac{K_1^*}{m}\ ;\ f_o = \frac{F_o}{m}\ ;\ \alpha = \frac{K_2^*}{m}\ ;\ \beta = \frac{K_3^*}{m}$$

λ - linearni koeficijent viskoznog trenja.

Rešenje diferencijalne jednačine (6) dobijeno uzastopnim približenjem prema |9| ima oblik:

$$Y = A^* + \sum_{i=1}^{3} A_i cosn(\omega_i + \delta) \qquad (7)$$

Parametar A_i predstavlja amplitude odgovarajućih harmonika.

Konstantna komponenta u spektru normalnih oscilacija ima oblik:

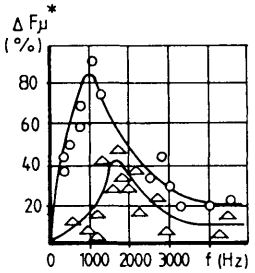
$$A^* = \frac{\alpha}{2} \frac{f_o^2}{|(\omega_o^2 - \omega^2) + 4\lambda\omega^2| . \omega_o^2} \qquad (8)$$

Ova komponenta odredjuje veličinu srednjeg rastojanja kontaktnih površina. Njena veličina zavisi od: amplitude i učestanosti dinamičkog opterećenja, nelinearnog koeficijenta krutosti, koeficijenta viskoznog trenja i sopstvene učestanosti oscilovanja.

Kao što se vidi iz jednačine (8), A^* ima maksimalnu vrednost pri rezonanci tj. kada je $\omega = \omega_o$. U tim uslovima dolazi do maksimalnog udaljenja kontaktnih površina i ostvarenja minimalne vrednosti koeficijenta trenja.

Eksperimentalnim istraživanjem na čeličnim kontaktnim elementima (R_z = 20 μm) blizu rezonantne oblasti i pri značajnim vrednostima f_o, komponenta A^* je dostigla veličinu 30% od amplitude oscilovanja |9|.

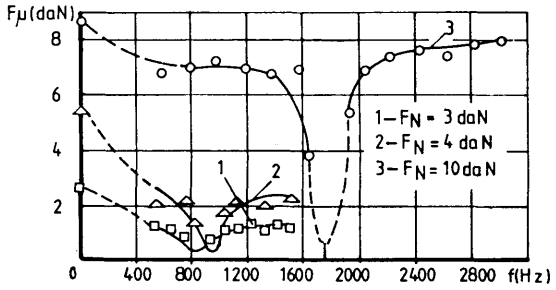
Sa promenom učestanosti dinamičkog opterećenja sila trenja ima minimum na rezonantnoj učestanosti, sl. 6.



Sl.6.-Zavisnost relativnog smanjenja sile trenja od učestanosti prinudnih normalnih oscilacija |8|
o - F_N = 0,25 daN
Δ - F_N = 1,05 daN.

Kod rezultata sa sl. 6 ekstremno smanjenje sile trenja je bilo na učestanosti koja se razlikuje za 10% od one proračunate prema jednačini (1). Razlog za ovo leži u uticaju krutosti elemenata strukture koja nosi tribomehanički sistem pri ispitivanju i nelinearnosti krutosti kontaktne zone.

Ako se učestanost prinudnih oscilacija menja blizu rezonantnog područja, tada će promena sile trenja u funkciji učestanosti biti veoma osetljiva, sl. 7 - kriva 3.

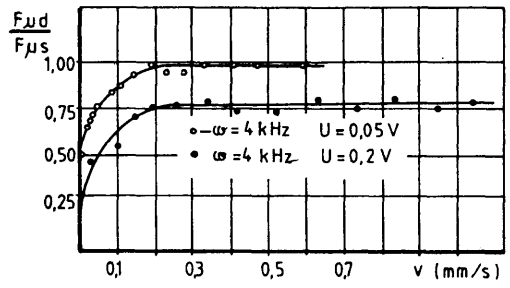


Sl. 7. - Zavisnost sile trenja od učestanosti prinudnih normalnih oscilacija |8|

Najveći uticaj normalnog dinamičkog opterećenja na smanjenje koeficijenta trenja dobija se pri malim brzinama klizanja, sl. 8.

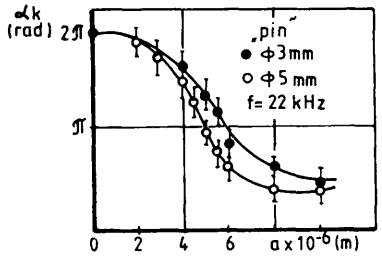
Rezultati sa sl. 8 dobijeni su na kontaktnim elementima: tvrdi metal/rubin za dve vrednosti napona napajanja (U) pobudjivača. Većoj vrednosti napona napajanja o-

dgovara i veće dinamičko opterećenje kontaktnih elemenata.



Sl. 8. - Zavisnost odnosa sila trenja pri dinamičkom i statičkom opterećenju od brzine klizanja |7|

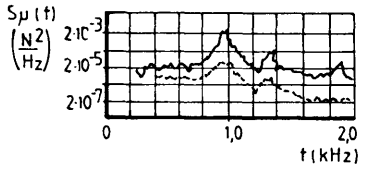
Promenom intenziteta prinudnih oscilacija menjaju se uslovi u zoni kontakta. Tako sa povećanjem amplitude oscilovanja dolazi do smanjenja vremena trajanja kontakta, što je eksperimentalno utvrdjeno i prikazano na sl. 9. Ekvivalent vremenu trajanja kontakta je ugao α_k (rad) koji predstavlja deo od jednog ciklusa oscilovanja (2π rad).



Sl.9.-Zavisnost vremena trajanja kontakta od amplitude oscilovanja |12|

Rezultati na sl. 9 su dobijeni bez prisustva maziva u zoni kontakta.

Uz minimalno prisustvo maziva izmedju kontaktnih površina dolazi do značajnog smanjenja dinamičkog opterećenja kontakta, sl. 10.



Sl.10.-Spektar snage sile trenja |13| (F_N=5,2 N; R_a=0,5 μm, v=27 cm/s) ____ suvo trenje, ---- granično podmazivanje

U tribomehaničkom sistemu izloženom tangencijalnim oscilacijama dolazi do smanjenja trenja izmedju kontaktnih površina |7, 8, 14|.

Smanjenje koeficijenta trenja je izmedju ostalog posledica promene pravca vektora sile trenja u odnosu na brzinu klizanja. Do ovog zaključka se dolazi analizom osnovne jednačine oscilovanja (sl. 4), tj:

$$z_{T''} = a \cdot \sin \omega t \qquad (9)$$

Tada je brzina oscilovanja pokretnog kontaktnog elementa:

$$v_{T''} = a \cdot \omega \cdot \cos \omega t \qquad (10)$$

Tako se u zavisnosti od trenutne vrednosti tangencijalne brzine $v_{T''}$ i brzine klizanja v može definisati karakteristični ugao koji odredjuje položaj pravca sile trenja u odnosu na pravac osnovnog kretanja (v) pokretnog kontaktnog elementa.

$$\varphi_v = arc\ tg \frac{v_{T''}}{v} \qquad (11)$$

Kod prinudnih tangencijalnih oscilacija, vektor sile trenja je usmeren suprotno od vektora trenutne rezultujuće brzine. Trenutna vrednost sile trenja u pravcu kretanja je:

$$F_\mu = F_N \cdot \mu \cdot \cos\ arc\ tg \frac{v_{T''}}{v} \qquad (12)$$

odnosno:

$$F_\mu = F_N \cdot \mu \cdot \frac{v}{\sqrt{v^2 + v_{T''}^2}} \qquad (13)$$

Iz jednačina (10) i (13) dobija se:

$$F_\mu = F_N \cdot \mu \cdot \frac{v}{\sqrt{v^2 + \omega^2 \cdot a^2 \cdot \cos^2 \omega t}} \qquad (14)$$

Jednačina (14) ima minimum u obliku:

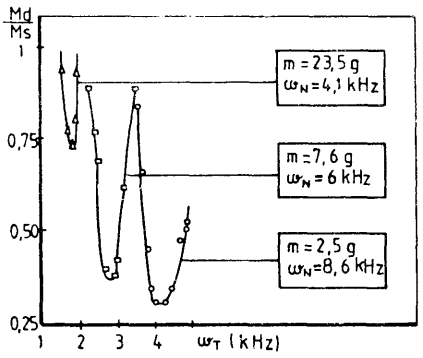
$$F_\mu = F_N \cdot \mu \cdot \frac{v}{\sqrt{v^2 + \omega^2 a^2}} \qquad (15)$$

Iz navedenog izraza se vidi, da pri konstantnoj amplitudi oscilovanja, sila trenja se monotono smanjuje sa porastom kružne učestanosti.

Tangencijalne prinudne oscilacije pobudjuju normalne, koje imaju rezonantnu učestanost. Eksperimentalno je utvrdjena veza normalnih i tangencijalnih učestanosti u obliku |7|:

$$\omega_T \approx \frac{\omega_N}{2} \qquad (16)$$

To znači da, ukoliko postoji rezonantna učestanost za normalne oscilacije, onda promena sile trenja prema jednačini (15) nije monotona opadajuća funkcija, već ista ima svoj minimum. Postojanje minimuma koeficijenta trenja potvrdjeno je pri ispitivanju tribomehaničkog sistema rukavac/klizno ležište kod prinudnih oscilacija u pravcu ose rukavca, sl. 11.



Sl. 11. - Zavisnost odnosa momenta trenja pri dinamičkom i statičkom opterećenju od učestanosti |7|

M_d-moment trenja pri dinamičkom opterećenju

M_s-moment trenja pri statičkom opterećenju

Prinudne tangencijalne oscilacije izazivaju smanjenje koeficijenta trenja do minimalne vrednosti, koja je na polovini rezonatne učestanosti u normalnom pravcu. Ovo je propraćeno i značajnim promenama topografije kontaktnih površina. Smanjenje koeficijenta trenja u ovakvim uslovima je prouzrokovani i skraćenjem vremena ostvarivanja pojedinih mikrokontakata tj. prekidanjem fizičkohemijskih procesa koji se odvijaju u kontaktnim slojevima |15, 16|.

Na osnovu prikazanog teorijskog razmatranja isplaniran je i izveden veoma obiman eksperimentalni program a rezultati će biti prikazani u narednom broju ovog časopisa.

LITERATURA

|1| ЗАПОРОЖЕЦ, В.В., ВАРХНО В.В., БЕРДИНСКИЙ Б.А., Динамика и численная оценка процессов контактного взаимодействия твердых тел, Международна конференция, Ташкент, Т.I., с. 22-26.

|2| АРОНОВ, СУЗА Д., КАЛПАКЯН., ПАРИФ., Взаимодействие между трением, износом и жесткостью системы, Част I, Проблемы трения, № 1, Т. 106, 1984., с. 53-58.

|3| KATO K., IWABUCHI A., KAYABA T., The effects of friction induced vibration on friction and wear, Wear 80 (1982), pp. 307-320.

|4| TABOR D., Friction the Present State of Our Understanding, ASME-ASLE 18-21, august 1980, San Francisko.

|5| НУРИ К.А., Некоторые факторьь, влияющеи на поведение поверхностей в условиях контакта, Проблемы трения, № 1, Т. 102, 1980., с. 14-19.

|6| NURI K.A., The effect of surface films on the static contact of rough flat surfaces, Wear, 42, (1979)., pp. 355-364.

|7| БУДАНОВ Б.В., КУДИНОВ В.А., ТОЛСТОЙ Д.М., Взаимосвязь трения и колебаний, Трение и износ, № 1, Т. I, 1980., с. 79-89.

|8| КРАГЕЛЬСКИЙ И.В., Трение изнашивание и смазка-кника 2, "Машиностроение", 1979., Москва.

|9| ИВЛЕВ В.И., О влиянии нормальных колебаний на величину силы трения, Машиноведение, № 3, 1981., с. 23-25.

|10| КОРИАУЛУ И.П., РАТНЕР С.Б., Применение закономерностей трения при постоянном контактировании к прерывистому трению, Трение и износ, № 5, Т. V, 1984, с. 833-840.

|11| КУРАПОВ П.А., ИВЛЕВ В.И., Исследование влияния состояния и свойств контакта на частотные характеристики пар трения, Трение и износ, = 6, T.I, 1980., с. 1045-1049.

|12| GOTO H., ASHIDA M., Effects of ultrasonic vibration on the wear characteristics of a carbon steel: analysis of the wear mechanism, Wear, 94(1984) pp. 13-27.

|13| СУМ А., КИМ Ц., Динамические нагружение сухого контакта с граничной смазкой под воздействием шероховатости при скольжении, Прожлемы Трения,№ 4, Т. 105, 1983., с. 9-13.

|14| HURUKI K., MINOROU A., Effect of vibrational amplitude on characteristics of friction and wear, J. Japan Soc. Lubr. Engr., No 4, Vol. 25,1980. pp. 240-244.

|15| BRONIEC Z., LENKIEWICZ W., Static friction processes under dynamic loads and vibration, Wear, 80 (1982), pp. 261-271.

|16| RICHARDSON R.S.H., NOLLE H., Surface friction unde time - dependent loads, Wear, 37 (1976), pp. 87-101.

UDK 621.9.042.922

ISTRAŽIVANJA

R. CEBALO

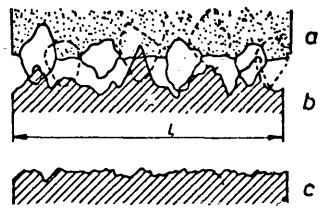
Korelacija izmedju hrapavosti brušene površine kod različitih postupaka brušenja

UVOD

Kvaliteta obradjene površine ima značajan utjecaj na eksploatacione karakteristike izradaka. Hrapavost obradjene površine definirana kao srednje aritmetičko odstupanje profila od srednje linije, značajna je za tribološko ponašanje obradaka u radnim uvjetima. Najveća visina neravnina, posebno promatrana u dijelu udubljenja, značajno utiče na dinamičku čvrstoću izradaka. Zato je potrebno poznavanje medjusobne zavisnosti najveće visine neravnina i srednjeg aritmetičkog odstupanja profila od srednje linije. Poznavajući ove osobine,koji su različiti kod različitih načina i postupaka obrade, može se utjecati na izbor načina obrade, koji će najbolje odgovarati eksploatacionim karakteristikama izradaka, posebno tribologiji obradnih površina.

UTJECAJ FAKTORA HRAPAVOSTI OBRADJENIH POVRŠINA KOD BRUŠENJA

Hrapavost brušene površine nastaje iz procesa odvajanja čestica, jer oštrice rezne površine brusa ostavljaju brazde na brušenoj površini, sl. 1.



Sl.1.-Shema oblikovanja hrapavosti brušene površine
a - brus
b - obradak
c - profil brušene površine

Oblik i dimenzije brazda su slučajnog karaktera i zavise od:

- načina profiliranja i ravnanja rezne površine brusa
- trošenja rezne površine brusa i oštrica
- krutosti brusnog sistema i sistema profilisanja, itd.

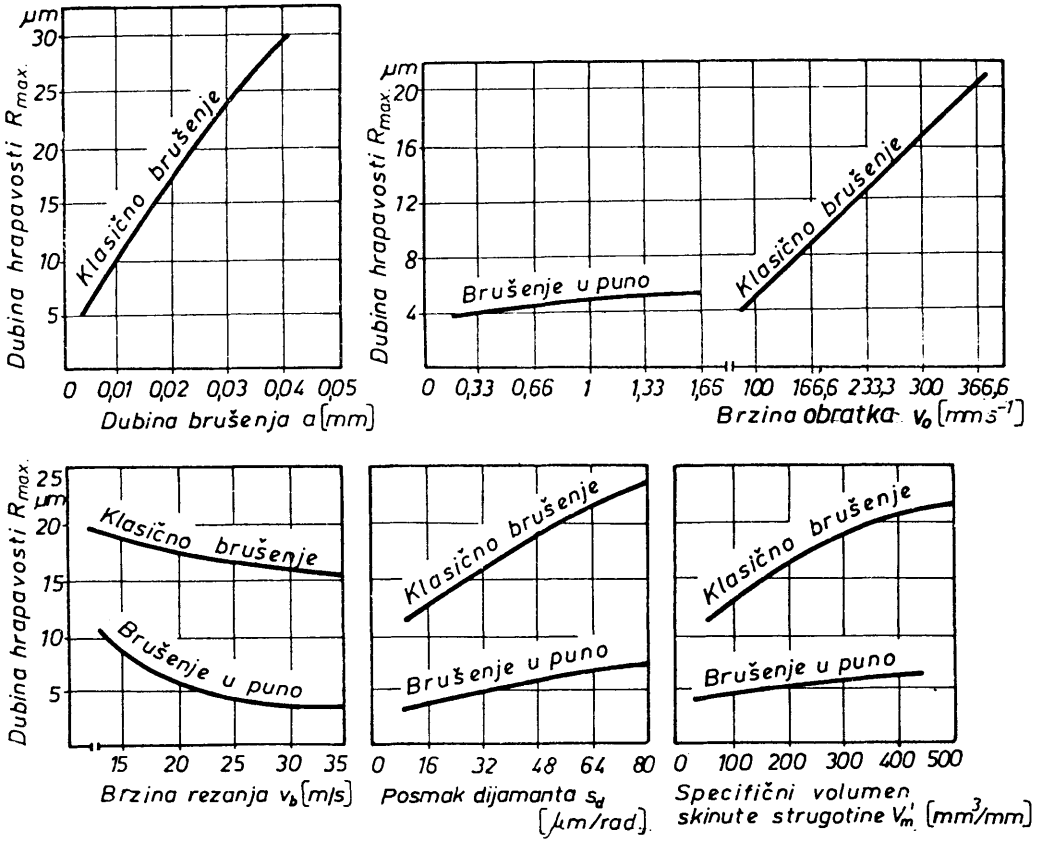
Hrapavost brušene površine ispitivali su mnogi autori, ali do jednoznačnih zakonitosti nisu došli. Dosadašnja istraživanja dala su slijedeće spoznaje, sl. 2.

- povećanje dubine brušenja, kod klasičnog brušenja, povećava hrapavost brušene površine i obrnuto kod brušenja u puno, |1|,
- porast brzine obratka, znatno povećava hrapavost brušene površine kod klasičnog brušenja, a slabije kod brušenja u puno,
- povećanjem brzine rezanja smanjuje se hrapavost brušene površine,
- povećanjem posmaka dijamanta, kod profiliranja jednoreznim dijamantom, povećava se hrapavost brušene površine,
- povećanjem specifičnog volumena skinute strugotine, povećava se hrapavost brušene površine, i
- povećanjem vremena izbrušavanja smanjuje se hrapvost brušene površine.

Hrapavost brušene površine prvenstveno zavisi o svojstvima rezne površine brusa, u prvom redu o zrnatosti brusa. Medjutim, dade se dokazati da se brusom iste zrnatosti i odgovarajućim uvjetima profiliranja može vršiti grubo i fino brušenje |1|.

Brusevi otvorenije strukture daju veću hrapavost brušene površine od bruseva zatvorenije strukture. Stupanj tvrdoće brusa djeluje na hrapavost brušene površine tako da brus većeg stupnja tvrdoće duže vremena zadržava zrna u vezivu pa se ona više istroše i tako ostvaruju manju hrapavost brušene površine. Obrnuto je kod bruseva manjeg stupnja tvrdoće, jer istrošena zrnca ispadaju, a na njihova mjesta dolaze nova oštrija zrna.

Kod brušenja tvrdih materijala, trošenje oštrica je veće, što ima za posljedicu manju hrapavost brušene površine.



Sl. 2. - Dubina hrapavosti u zavisnosti od elemenata i uvjeta brušenja |2|
Vrijedi za: - brus Ek 46 I 7 ke
- materijal Ck 45 N, te za:

Klasično brušenje:

a = 0,02 mm
v_o = 300 mms^{-1}
v_b = 25 m/s
s_d = 32 μm/rad.
v_m = 200 mm^3/mm

Brušenje u puno:

a = 1 mm
v_s = 1 mm s^{-1}
v_b = 25 m/s
s_d = 32 μm/rad
v_m = 200 mm^3/mm

SHIP znatno djeluje na hrapavost brušene površine jer smanjuje trošenje oštrica, čisti reznu površinu brusa i smanjuje trenje. Rezno ulje daje manju hrapavost brušene površine od emulzija, posebno kod većih učina brušenja.

MATEMATIČKI MODEL KORELACIONE VEZE

Za odredjivanje korelacione veze izmedju najveće visine neravnina i srednjeg aritmetičkog odstupanja profila od srednje linije, vršena su prethodno planirana ispitivanja brušenja različitih materijala sa različitim brusevima i različitim postupcima brušenja i profiliranja. Kod toga je snimana hrapavost brušene poršine. Iz grafičkog prikaza rezultata ispitivanja uočava se linearna zavisnost izmedju mjerenih parametara hrapavosti brušene površine. Stoga se korelaciona veza izmedju R_{max} i R_a može predočiti izrazom:

$$y = ax + b \qquad (1)$$

Primjenom metode najmanjih kvadrata (3) i (4), dobijaju se slijedeći izrazi za numeričke vrijednosti a i b:

$$b = \frac{\Sigma x_i y_i - \frac{\Sigma x_i \Sigma y_i}{n}}{\Sigma x_i^2 - \frac{(\Sigma x_i)^2}{n}} \qquad (2)$$

$$a = \left(\frac{\Sigma y_i}{n} - b\,\frac{\Sigma x_i}{n}\right) \qquad (3)$$

Jačina korelacione veze, izmedju ispitanih i proračunatih vrijednosti R_{max} i R_a, dokazuje se koeficijentom korelacije. Korelaciona veza je jača što je koeficijent korelacije bliži jedinici. Koeficijent korelacije računat je po slijedećoj formuli:

$$r = \frac{\left(\Sigma x_i\, y_i - \frac{\Sigma x_i \Sigma y_i}{n}\right)^2}{\left|\Sigma x_i^2 - \frac{(\Sigma x_i)^2}{n}\right| \left|\Sigma y_i^2 - \frac{(\Sigma y_i)^2}{n}\right|} \qquad (4)$$

REZULTATI ISPITIVANJA I NJIHOVA OBRADA

U ovim pokusima vršeno je brušenje slijedećim postupcima:

- ravno obodno brušenje
- vanjsko obodno brušenje
- unutrašnje obodno brušenje

Izmjerene vrijednosti hrapavosti date su u tabelar 1, 2 i 3. Mjerenja hrapavosti su vršena na dijelovima redovne proizvodnje uz više ponavljanja. U svim ispitanim slučajevima, brušenje je vršeno sa brusevima normalne strukture, prilagodjene uobičajenim uvjetima brušenja, prema postupku brušenja i materijalu brušenja. Profiliranje rezne površine bruseva vršeno je jednoreznim

dijamantom. U svim slučajevima radi se o finom završnom brušenju sa izbrušavanjem.

Rezultati iz tabela 1, 2 i 3 su grafički prikazani na slikama 3, 4 i 5. Grafički prikaz zavisnosti R_{max} i R_a, za različite materijale brušenja, pokazuje da sve vrijednosti hrapavosti brušene površine dobivene obradjenim postupkom brušenja pripadaju istom skupu. Ovo je omogućilo da se matematička obrada rezultata ispitivanja izvrši nad svim rezultatima pojedinog postupka brušenja bez obzira na materijal. Na ovaj način su dobivene slijedeće zavisnosti:

- za ravno obodno brušenje:

$$R_{max} = 7.88\ R_a \qquad (5)$$

uz koeficijent korelacije $r = 0,989$,

- za vanjsko obodno brušenje:

$$R_{max} = 8.1\ R_a \qquad (6)$$

uz koeficijent korelacije $r = 0.999$, i

- za unutarnje okruglo brušenje:

$$R_{max} = 9.256\ R_a \qquad (7)$$

uz koeficijent korelacije $r = 0.99926$.

Tablica 1. - VRIJEDNOSTI HRAPAVOSTI ZA RAVNO BRUŠENJE

R. br.	Vrsta materijala							
	Č.5426 60-62 HRc		Č.0361 103-125 HB		Č.1221 56-60 HRc		GGG-70 255-221 HB	
	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]
1.	0,54	4,2	0,43	2,28	0,35	2,68	0,85	7,52
2.	0,28	2,0	0,21	1,58	0,35	2,18	0,76	7,04
3.	0,50	4,5	0,33	2,3	0,38	2,0	0,87	7,44
4.	0,15	1,3	0,22	2,14	0,42	2,98	0,91	6,56
5.	0,3	3,5	0,22	1,82	0,35	2,34	0,78	5,96
6.	0,15	1,96	0,25	2,5	0,4	2,5	0,8	6,1
7.	0,46	3,96	0,31	1,95	0,45	2,7	0,88	6,8
8.	0,26	2,2	0,36	2,9	0,5	3,1	0,82	7,2
9.	0,35	3,1	0,40	2,8	0,48	3,5	0,92	7,8
10.	0,4	3,3	0,32	2,5	0,45	3,4	0,75	6,5

Visoka vrijednost koeficijenta korelacije r ukazuje na linijsku zavisnost odnosa pokusnih i računskih veličina hrapavosti brušene površine, kako je matematičkim modelom (1) pretpostavljeno.

Kvadrati koeficijenata korelacije, kod svih ispitanih postupaka brušenja, se nalaze u području:

$$r^2 = 0,978 - 0,998$$

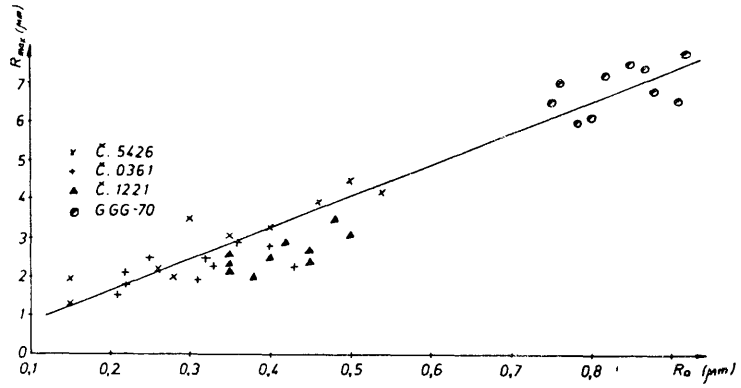
što znači, da postoji 97,8 postotna podudarnost pokusom dobivenih vrijednosti i računskih veličina, a da su 0,2--2,2% slučajnosti, koje ovom analizom pokusa i obradom, ostaju nerazjašnjene.

Tablica 2. - VRIJEDNOSTI HRAPAVOSTI ZA VANJSKO BRUŠENJE

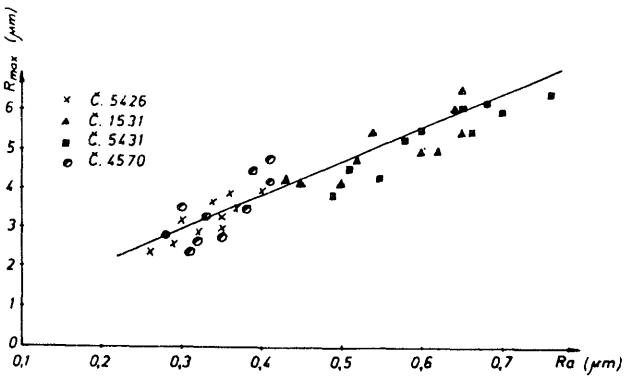
R. br.	Vrsta materijala									
	Č.5426 60-62 HRc		Č.4739 900HV		Č.5431 250-309HB		666-40 140-200HB		Č.5426 62-64 HRc	
	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]
1.	0,49	3,12	0,29	3,52	0,59	4,60	0,20	1,98	0,41	4,2
2.	0,49	3,18	0,23	2,22	0,48	3,80	0,46	3,30	0,29	2,32
3.	0,45	2,88	0,29	2,16	0,55	4,8	0,27	2,8	0,37	2,92
4.	0,47	3,0	0,40	3,40	0,61	5,0	0,42	3,2	0,40	3,08
5.	0,45	3,28	0,25	2,5	0,39	3,20	0,44	3,70	0,37	2,96
6.	0,38	2,82	0,37	2,0	0,42	3,80	0,32	3,0	0,36	2,76
7.	0,42	2,8	0,35	3,20	0,45	3,52	0,21	3,04	0,40	3,52
8.	0,40	2,50	0,31	3,0	0,56	4,0	0,24	2,5	0,30	3,28
9.	0,43	2,6	0,26	2,40	0,50	4,20	0,36	3,30	0,50	3,88
10.	0,50	3,50	0,32	2,80	0,52	4,40	0,37	3,50	0,31	2,66

Tablica 3. - VRIJEDNOSTI HRAPAVOSTI ZA UNUTARNJE BRUŠENJE

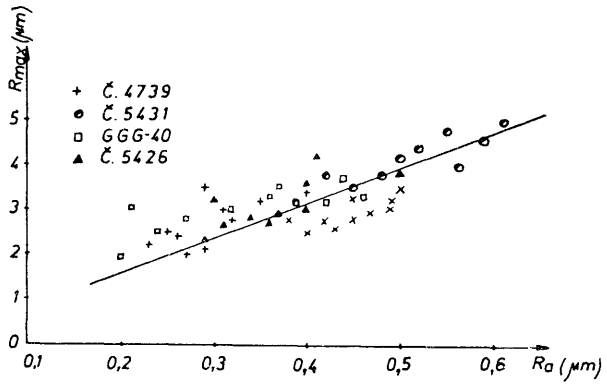
R. br.	Vrsta materijala							
	Č.5426 60-62 HRc		Č.1531 163-179 HB		Č.5431 270-285 HB		Č.4570 235-277 HB	
	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]	R_a [µm]	R_{max} [µm]
1.	0,35	3,32	0,65	6,68	0,58	5,32	0,41	4,80
2.	0,26	2,44	0,54	5,48	0,51	4,52	0,28	2,50
3.	0,37	3,56	0,60	5,0	0,76	6,40	0,32	2,76
4.	0,36	3,92	0,43	4,32	0,49	3,86	0,30	3,5
5.	0,32	2,98	0,62	4,96	0,70	6,0	0,33	3,60
6.	0,35	3,0	0,45	4,2	0,55	4,3	0,38	3,50
7.	0,40	4,0	0,50	4,2	0,65	6,1	0,35	2,8
8.	0,30	3,2	0,52	4,8	0,68	6,2	0,31	2,4
9.	0,29	2,6	0,64	6,1	0,60	5,5	0,39	4,5
10.	0,34	3,7	0,65	5,5	0,66	5,5	0,42	4,25



Sl. 3. - Zavisnost R_{max} i R_a za ravno brušenje



Sl. 5. - Zavisnost R_{max} i R_a za unutarnje brušenje



Sl. 4. - Zavisnost R_{max} i R_a za vanjsko brušenje

ZAKLJUČAK

Ispitivanja zavisnosti R_{max} i R_a brušenih površina različitih materijala brušenja, dobivenih ravnim, vanjskim i unutarnjim brušenjem, te njihova matematička obrada, pokazuju slijedeće:

- da postoji linearna zavisnost R_{max} i R_a brušenih površina, kod svih ispitanih postupaka brušenja i materijala brušenja, sa jakom korelacionom vezom,
- da se odnos R_{max} i R_a brušenih površina, razlikuje kod pojedinih ispitanih postupaka brušenja, dok vrsta materijala brušenja ne utiče na taj odnos.

LITERATURA

[1] R. CEBALO, Optimalno područje brušenja u puno vatrootpornih Ni-legura za plinske turbine, doktorska disertacija, FSB-Zagreb, 1985.

[2] H. BRANDIN, Vergleichende Unterzuchung zwischen Pendel und Tiefschleifen 1. Feinbearbeitungs Kolloquium, TU Braunschweig 1976.

[3] S. SEKULIĆ, P. KOVAČ, Korelacija izmedju najveće visine neravnina i srednjeg aritmetičkog odstupanja profila od srednje linije obradjene površine, Tribologija u industriji, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1986.

[4] Ch. LIPSON, N.J. SHETH, Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments, McGraw-Hill Kogakushca, Ltd. Tokyo, 1973.

ISTRAŽIVANJA

UDK 621.92'9.015.004.6

B. KRŠLJAK

Učinak tocila i vreme obrade brzoreznih čelika

1. UVOD

Učinak tocila (odnos zapremine skinutog metala i zapremine trošenja tocila) $G = V_m/V_t$ (cm^3/cm^3) je parametar za ocenu rezne sposobnosti tocila koji govori koliko se jedinica zapremine skinutog metala odvoji po jedinici zapremine trošenja tocila. Učinak tocila i glavno vreme brušenja t_g (parametar ekonomike) koriste se i kao pokazatelji za ocenu obradljivosti |1|.

Obzirom na značaj ovih parametara - pokazatelja za proces brušenja, korisno je znati njihove zavisnosti od odgovarajućih uticajnih veličina. U radu je pokazan postupak odredjivanja funkcija učinka tocila i glavnog vremena obrade u zavisnosti od elemenata režima bruše - nja pri ravnom brušenju brzoreznog čelika obimom konvencionalnog tocila.

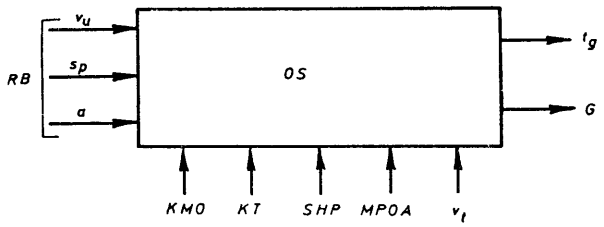
2. NAČIN I USLOVI IZVODJENJA ISPITIVANJA

Ispitivanja su obavljena na brusilici za ravno brušenje sa pravougaonim radnim stolom tip 3G71 koja je proizvedena u SSSR-u 1975. godine. Brušenje je vršeno obimom elektrokorundnog tocila 2B54K8V dimenzija 250x76x10 mm koje je proizvedeno u industriji "8 Mart" iz Ade. Uzroci za ispitivanje su bili od brzoreznog čelika Č.9780, prizmatičnog oblika dimenzija 100x42x20 mm, tvrdoće 64 H_{RC}.

Kod svih eksperimenata korišćeno je ulje za hladjenje "Castrol ilogrind 483". Količina rashladnog sredstva u jedinici vremena je regulisana održavanjem stal - nog pritiska pomoću manometra koji je bio ugradjen u instalaciji ispred mlaznika.

Režim brušenja: brzina stola (uzdužni posmak) v_u = (5; 10 i 20) m/min, poprečni pomak s_p = (0,4; 0,8 i 1,6) mm/h i dubina brušenja a = (0,005; 0,01 i 0,02) mm. U toku ispitivanja odredjivana je zapremina trošenja tocila i merena zapremina obrušenog materijala. Zapremina trošenja tocila i merena zapremina obrušenog materijala. Zapremina trošenja tocila za jedan komad odredjivana je prema smanjenju poluprečnika tocila ΔR, koje je mereno pomoću pribora |2|. Zapremina obrušenog materijala je odredjivana merenjem visine uzorka pre početka i posle završenog eksperimenta |2|. Ulazni parametri u obradni sistem (sl. 1) su:

- režimi brušenja (brzina stola - v_u, poprečni po - mak - s_p, dubina brušenja - a) (RB).



Sl. 1. - Šema obradnog sistema sa ulaznim, stalnim i izlaznim parametrima

Stalni parametri obradnog sistema su:
- karakteristike obratka (KMO),
- karakteristike tocila (KT),
- sredstvo za hladjenje i podmazivanje (SHP),
- dinamičko stanje obradnog sistema (mašine-M, pribora-P, obratka-O, alata-A) (MPOA) i
- obimna brzina tocila (brzina rezanja) (v_t).

Izlazni parametri iz obradnog sistema su:
- glavno vreme brušenja po 1 cm^3 obrušenog materijala (t_g) i
- učinak tocila (G).

Zavisnost izlaznih parametara od ulaznih može se izraziti u obliku stepenih funkcija:

$$G = B_1 v_u^{p1} s_p^{p2} a^{p3} \quad (1)$$

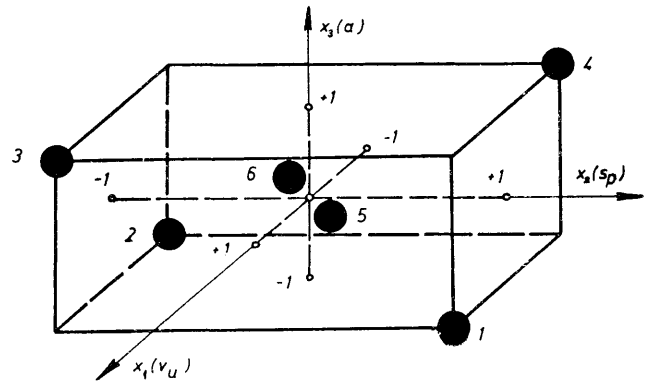
$$t_g = B_2 v_u^{q1} s_p^{q2} a^{q3} \quad (2)$$

Navedene zavisnosti (1) i (2) mogu se transformisati na linearni oblik (model prvog reda) |3|:

$$\hat{y}_1 = b_1 + p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 \quad (1.1)$$

$$\hat{y}_2 = b_2 + q_1 x_1 + q_2 x_2 + q_3 x_3 \quad (2.1)$$

Plan matrica parcijalnog ortogonalnog plana (prva polureplika) (sl. 2) sa brojem eksperimenata $N = 2^{k-1} + n_o = 2^{3-1} + 2 = 6$, za učinak tocila G (cm^3/cm^3) i glavno vreme brušenja t_g (min/cm^3) data je u tabeli 1 |3|.



Sl. 2. - Šema ortogonalnog parcijalnog plana-prava polureplika

TABELA 1

R.br. eksper.	Vrednosti faktora (režima) $x_1(v_u)$ (m/min)	$x_2(s_p)$ (mm/h)	$x_3(a)$ (mm)	Plan matrice x_o	x_1	x_2	x_3	Izmerene vrednosti G cm^3/cm^3	$\ln G$	t_g min/cm^3	$\ln t_g$
1	20	1,6	0,005	+1	+1	+1	+1	9,1996	2,2192	8,6880	2,1619
2	5	0,4	0,005	+1	-1	-1	-1	16,8350	2,8235	172,7157	5,1516
3	20	0,4	0,02	+1	+1	-1	+1	12,5628	2,5207	8,3853	2,1265
4	5	1,6	0,02	+1	-1	+1	+1	10,0402	2,3066	8,7562	2,1698
5	10	0,8	0,01	+1	0	0	0	11,5473	2,4464	16,4506	2,8004
6	10	0,8	0,01	+1	0	0	0	13,6612	2,6146	16,3130	2,7920

3. REZULTATI ISPITIVANJA

3.1. Funkcija učinka tocila

Polazeći od jednačine (1.1) a prema (3) sledi:

$$b_1 = (G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6)/6 =$$

$$= (2,2192+2,8235+2,5307+2,3066+2,4464+2,6146)/6 =$$

$$= 2,4902$$

$$p_1 = (G_1 - G_2 + G_3 - G_4)/4 =$$

$$= (2,2192-2,8235+2,5307-2,3066)/4 = -0,0951$$

$$p_2 = (G_1 - G_2 - G_3 + G_4)/4 =$$

$$= (2,2192-2,8235-2,5307+2,3066)/4 = -0,2071$$

$$p_3 = (-G_1 - G_2 + G_3 + G_4)/4 =$$

$$= (-2,2192-2,8235+2,5307+2,3066)/4 = -0,0513$$

Prema dobijenim vrednostima za b_1, p_1, p_2, p_3 i za x_1, x_2 i x_3, prema formulama transformacije (3) zamenom u (1.1) dobija se:

$\hat{y}_1 = 2,3985 - 0,1372 \ln v_u - 0,2977 \ln s_p - 0,0740 \ln a$, iz ove jednačine sledi funkcija učinka tocila u obliku:

$$\hat{y}_1 = G = 11,0067\, v_u^{-0,1372}\, s_p^{-0,2988}\, a^{-0,0740} \quad (3)$$

3.2. Funkcija glavnog vremena brušenja

Polazeći od jednačine (2.1) a prema (3) sledi:

$$b_2 = (t_{g1} + t_{g2} + t_{g3} + t_{g4} + t_{g5} + t_{g6})/6 =$$

$$= (2,1619+5,1516+2,1265+2,1698+2,8004+2,7920)/6=2,8670$$

$$q_1 = (t_{g1} - t_{g2} + t_{g3} - t_{g4})/4 =$$

$$= (2,1619-5,1516+2,1265-2,1698)/4 = -0,7582$$

$$q_2 = (t_{g1} - t_{g2} - t_{g3} + t_{g4})/4 =$$

$$=(2,1619-5,1516-2,1265+2,1698)/4=-0,7366$$

$$q_3 = (-t_{g1} - t_{g2} + t_{g3} + t_{g4})/4 =$$

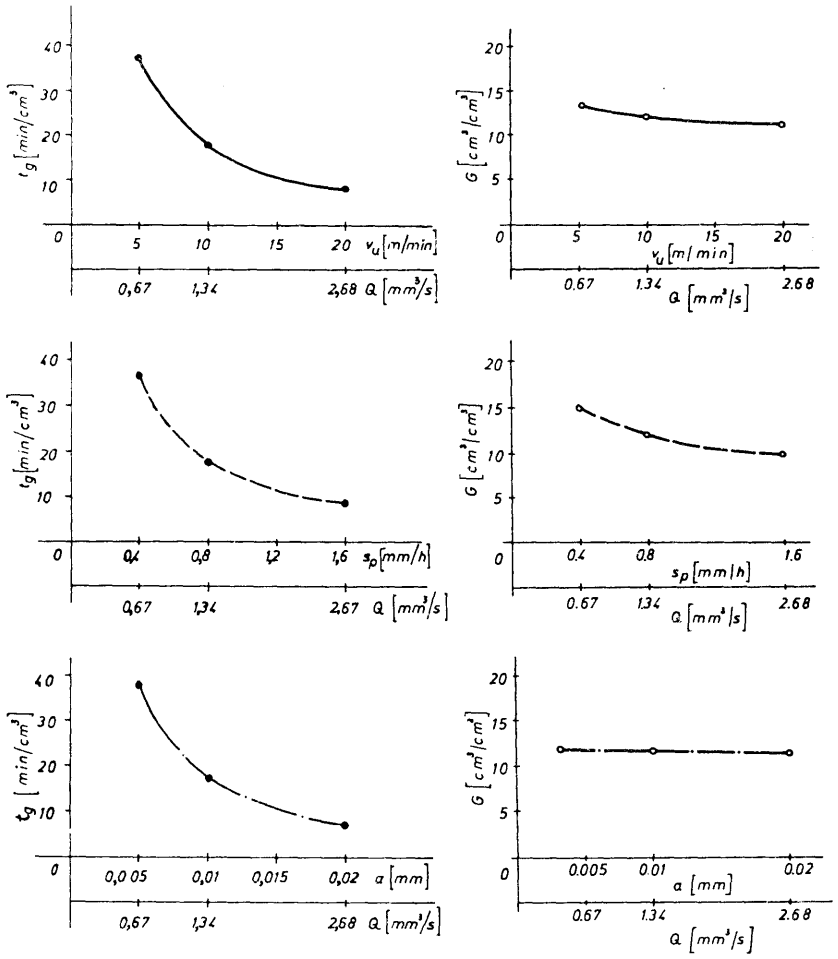
$$=(-2,1619-5,1516+2,1265+2,1618)/4=-0,7543$$

Prema dobijenim vrednostima za b_2, q_1, q_2, q_3 i za x_1, x_2 i x_3 prema formulama transformacije (3) zamenom u (2.1) dobija se:

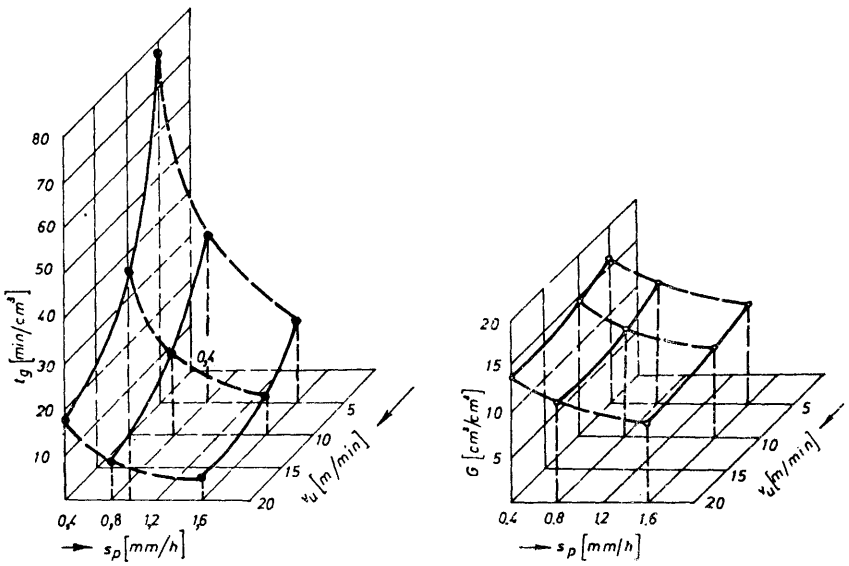
$\hat{y}_2 = 0,1371 - 1,0938 \ln v_u - 1,0627 \ln s_p - 1,0882 \ln a$, iz ove jednačine sledi funkcija glavnog vremena brušenja u obliku:

$$\hat{y}_2 = t_g = 1,1469\, v_u^{-1,0938}\, s_p^{-1,0627}\, a^{-1,0882} \quad (4)$$

Zavisnost učinka tocila G-jednačina (3) i glavnog vremena brušenja t_g - jednačina (4) od elemenata režima brušenja date su na sl. 3. Vrednosti su računate tako, za odredjenu veličinu jednog elementa uzimane su srednje vrednosti ostala dva.



Sl. 3. - Učinak tocila G (cm^3/cm^3) i glavno vreme brušenja t (min/cm^3) u zavisnosti od elemenata režima brušenja



Sl. 4. - Funkcije učinka tocila G i glavnog vremena brušenja t_g u zavisnosti od brzine stola i poprečnog pomaka

Iz jednačine (3) se vidi da najveći uticaj na učinak tocila ima poprečni pomak, zatim brzina stola a najmanji dubina brušenja.

Na glavno vreme brušenja - jednačina (4) najveći uticaj ima brzina stola, a najmanji poprečni pomak.

Dijagrami zavisnosti učinka tocila i vremena brušenja od dva elementa režima brušenja dati su na sl. 4.

Vrednosti za crtanje dijagrama su računate iz jednačina (3) i (4) tako što je za odredjenu vrednost jednog i drugog elementa režima brušenja uzimana srednja vrednost (medjuvrednost) trećeg.

4. ZAKLJUČCI

Elementi režima brušenja imaju različit uticaj na učinak tocila i vreme brušenja.

Na glavno vreme brušenja njihov uticaj je nesrazmeran i najveći uticaj ima poprečni pomak, dok je uticaj dubine brušenja neznatan.

LITERATURA

|1| JOVIČIĆ M., KRŠLJAK B., VUKOSAVLJEVIĆ R., DROBNJAK V., Obrada brušenjem identifikacija karakteristika stanja i optimizacija procesa, Mašinski fakultet, Jupiter zajednica, Beograd, 1986.

|2| KRŠLJAK B., Optimizacija procesa ravnog brušenja alatnih čelika sa stanovišta uticaja karakteristika tocila i uslova obrade. Doktorska disertacija Mašinski fakultet, Beograd, 1981.

|3| STANIĆ J., Primena matematičke teorije planiranja eksperimenata na ispitivanje obradljivosti materijala. Elaborat br. 145/71, Institut za alatne mašine i alate, Beograd, 1971.