



tribologija u industriji

sadržaj

contents

содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ПЕРЕДОВИЦАISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯNOVOSTI
NEWS
ИЗВЕСТИЯKNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫNAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯREZIMEA
ABSTRACTS
РЕЗЮМЕ

M. NEDELJKOVIĆ: Osnovni koncept projektovanja i konstruisanja tribomehaničkih sistema The Base Design Concept of Tribomehcanical System Основный концепт проектирования трибомеханических систем	3
B. IVKOVIĆ: Razmatranje mogućnosti određivanja obradivosti materijala preko postojanosti alata merenjem otpora rezanja Machinability Index on the Basis of Cutting Force and Tool Life Возможность определения обрабатываемости материала на основании износостойкости инструмента определяемой измерением сопротивления резанию	6
S. TANASIJEVIĆ: Tribologija u konstruisanju Tribology in Design Трибология в конструировании	12
Ю. Г. КАБАЛДИН: Strukturno-energetski prilaz proučavanju procesa trenja, habanja i podmazivanja u obradi metala rezanjem The Structure - Energy Approach to Friction, Wear and Lubrication Study in Metal Cutting Структурно-энергетический подход изучению процесса трения, изнашивания и смазки в обработке металла резанием	19
V. B. ŠOLAJA: Trošenje železničkih šina - prvi tribološki napis u Srbiji Medjunarodni savet za tribologiju	24
	25
	29
	31
	32

Osnovni koncept projektovanja i konstruisanja tribomehaničkih sistema

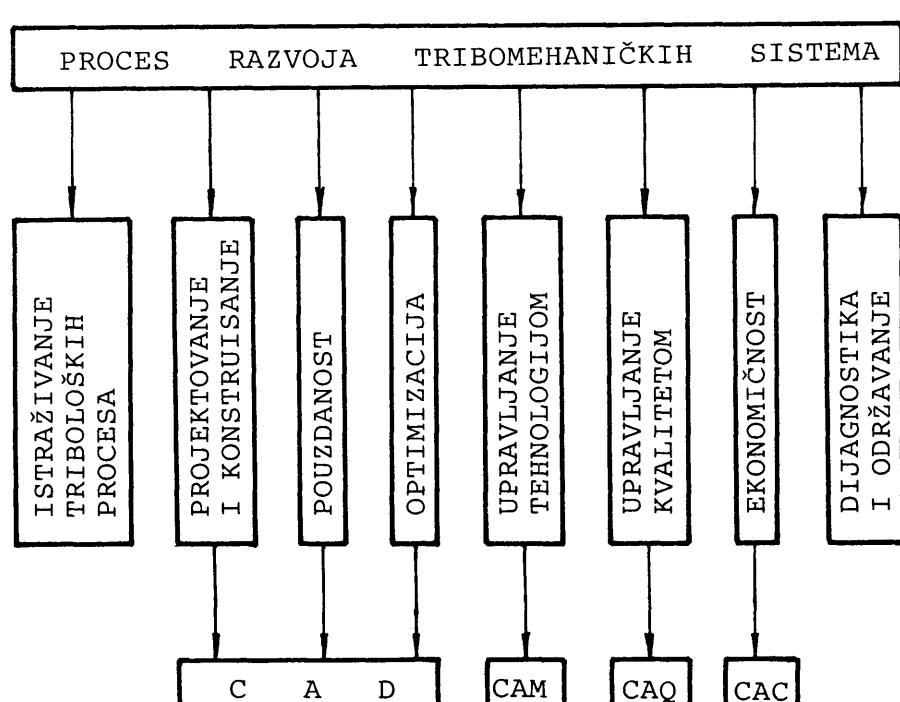
Savremeni razvoj tribomehaničkih sistema (TMS) predstavlja kompleksno i komplementarno naučno istraživački napor u kome projektovanje i konstruisanje zahteva strogo metodološki pristup procesu razvojnog projektovanja i konstruisanja TMS. Ova činjenica je bitan činilac stvaranja proizvoda visokih tehničko-tehnoloških performansi, uz puno respektovanje ekonomičnosti proizvodnje i eksploatacije.

Ako se na osnovu opšte teorije tehničkih sistema, tribologije, nauke o

konstruisanju i teorije procesa konstruisanja koncipira jedan od mogućih pristupa projektovanju TMS, onda takav koncept u najopštijem obliku ima konfiguraciju prema sl. 1. Autor ukazuje da se svaki blok kompleksnog procesa bazira na širokim teorijsko-eksperimentalnim naučnim saznanjima, uz korišćenje savremenih metoda i računara. Ovakav koncept projektovanja i konstruisanja TMS ima sva obeležja CIM tehnologije.

Ne ulazeći u elaboriranje poznatih teorijsko eksperimentalnim metoda *istraživanja triboloških procesa*, koja stvaraju skup relevantnih saznanja za dalje usavršavanje konkretnih TMS, ovde se samo potencira imperativna potreba stvaranja banke podataka u okviru CIM tehnologije, koja će da služi kao osnova za projektovanje i konstruisanje tih sistema. Ovim se završava osvrt na prvi blok sa sl. 1.

Proces projektovanja i konstruisanja TMS uz korišćenje CAD tehnike



Slika 1.

prikazuje se u najopštijem blok dijagramu na sl. 2.

Ako se *cilj* razvoja TMS definiše u najopštijem obliku sa stanovišta poslovnih rezultata, onda se pri *definiciji projektnog zadatka* koncretizuju

Pri projektovanju TMS pretražuju se principski moguća, alternativna rešenja za realizaciju glavnih funkcija sistema, stvaranjem strukture funkcija sistema. Treba naglasiti da je izbor najpovoljnije varijante tehničkog principa primaran uslov za optimizaciju celog sistema. U

crteži, sastavnice i druge podloge za tehnološku pripremu i proizvodnju u CIM konceptu.

Pošto se u fazi strukturiranja i konstruisanja vrši dimenzionisanje, optimiziranje i matematičko modeliranje, pošto se tada koriste i analitičke metode proračuna, treba istaći da postoje dve karakteristične metode: deterministički i stohastički metod proračuna radnih i kritičnih karakteristika triboloških parova. Do sada je široku primenu imao deterministički metod proračuna površinske otpornosti kontaktnih površina. Međutim, stvarna opterećenja i tribološki procesi imaju izraziti slučajan karakter i zbog toga određivanju merodavnih opterećenja za sve vrste proračuna treba prići na savremeni stohastički metod. U tome cilju je neophodno pristupiti stvaranju zapisu realnih opterećenja i uslova, njihovoj obradi i formirajući odgovarajućih algoritama i programa radi korišćenja računara. Iz ove činjenice istraživačke laboratorije i obrazovne institucije moguće bi da usmeravaju teme istraživanja i usavršavanje kadrova.

Pri projektovanju i konstruisanju TMS u pogledu efektivnosti sistema treba se pridržavati poznataih *metoda za određivanje pouzdanosti* vremenski zavisnih i vremenski nezavisnih sistema, kao i pouzdanosti sa osnovom na Markovljev proces i teoriju. Pored toga, konstruktor je kod složenijih TMS obavezan da primenjuje metode alokacije pouzdanosti na strukturne elemente tog sistema. Veliki broj metoda alokacije u primeni potvrđuje autorov zaključak na početku članka da se proces projektovanja i konstruisanja ne sme voditi voluntaristički, nego se mora izvršavati kompleksno metodološki. U teoriji pouzdanosti tehničkih sistema uopšte, a posebno za TMS u poslednje vreme, oko tri decenije, razvijena je matematička teorija pouzdanosti, kao teorija pouzdanosti u užem smislu. Osnov na pitanja na koja ova matematička teorija daje odgovor čine sledeće pitanja: (i) modeliranje stanja i trošenja sistema (ii) procena svih parametra pouzdanosti sistema, (iii) optimizacija mera i sredstava za održavanje i regeneraciju radne ispravnosti, (iv) istraživanje međuzavisnosti parametara pouzdanosti sistema i njegovih podsistema. U cilju povećanja pouzdanosti TMS vrše se odredjene modifikacije. Matematički

Slika 2.

tehničko-tehnološki i ekonomski uslovi koji omogućuju ostvarenje postavljenog cilja pri realnim uslovima i ograničenjima. Ovo predstavlja opšte uslove za definisanje funkcije cilja pri optimizaciji varijantnih rešenja.

Nepotpuno ili nestručno definisanje projektnog zadatka izaziva lutanje i neophodne revizije u kasnijim fazama procesa, što usporava ostvarivanje cilja, ali se i povećavaju troškovi razvoja. Zbog toga se ovom bloku mora posvetiti ozbiljna stručna rasprava i jasan zaključak.

U ovoj fazi varijanti koncepcijskih rešenja na osnovu matrice varijanti, koja se određenim metodama vrednuje, formira se *koncept rešenja*.

Struktuiranjem TMS kombinuju se alternative na osnovu novih sklopova, standardizovanih podsklopova i naslednjih rešenja. Ovaj princip je veoma značajan sa gledišta troškova razvoja, konkurenčije i roka za ostvarivanje proizvoda.

Modeliranje proizvoda se razmatra sa stanovišta funkcije, geometrije i tehnologije. To se realizuje bilo u α-numeričkim ili grafičkim 2-D, odnosno 3-D modelima. Iz ovog bloka rezultuju

modeli koji opisuju proces rasta pouzdanosti nazivaju se modelima rasta pouzdanosti. U grupi determinističkih modela rasta nalazi se Dualov model, koji je matematički jednostavan i veoma praktičan za primenu.

Kvalitet i cena su presudni atributi proizvoda koji mu osigurava konkurenčnost. Polazeći od ove činjenice pri projektovanju TMS neophodno je u bloku aktivnosti, predviđenom za obezbeđivanje kvaliteta, koristiti razvijene algoritme i programe u CAQ tehnicici. Poznato je da ciklus kvaliteta predstavlja zatvoreni sistem svestrane aktivnosti i odlučivanja od planiranja, konstruisanja, proizvodnje i provere kvaliteta TMS. U kompleksu obezbeđenja kvaliteta CAQ težišne tačke su visoki standardi za kvalitet, koncepcija sistema CAQ, strategija i tehnologija ispitivanja i kontrole kvaliteta sa specifičnim kadrovima za sve faze realizacije.

U planiranju obezbeđenja kvaliteta uz primenu računara neophodno je stvoriti osnovna pravila za tehnologiju ispitivanja i kontrolu, algoritmizirati proces ispitivanja, izraditi klasifikaciju sredstava za kontrolu i definisati planove kontrole.

U strategiji za obezbeđenje kvaliteta definišu se granične vrednosti kvaliteta

za najvažnije parametre proizvoda i vrši se izbor neophodnih mernih sredstava na osnovu potrebe preduzeća, uz uvažavanje ekonomičnosti nabavke i korišćenja tih sredstava. Pored toga je neophodna kompletna metrološka oprema sa specifičnim programom za računar, primereno konkretnom mašinskom objektu ili elementu (ispitivanje dinamičke uravnoteženosti rotora, mere navojnih vretena). Analiza kvaliteta (CAN) u sistemu CAQ prestavlja primenu mikroračunara sa grafikom za metematički statističku analizu stabilnosti tehnološkog procesa u izradi elemenara TMS. Poznat je programski paket INQUAMESS-QAN. Obezbeđenje kvaliteta stvara i odredjene troškove. Postoji programski paket INQUAMESS KOST-SEP kojim se optimira profit s obzirom na troškove testa kvaliteta. U zadnje vreme za obezbeđenje kvaliteta razvijaju se specijalizovani ekspertri sistemi ali za sada sa ograničenom i strogo orijentisanim primenom i efektima.

Optimizacija je sledeći blok aktivnosti u procesu razvojnog projektovanja TMS, koji ima konkretni smisao samo za definisani cilj i pri određenim ograničenjima. U praksi projektovanja i razradi mašinskih sistema koristi se metoda optimizacije parametara, metod proučavanja operacija, metod modeliranja i matematičkog

programiranja. Treba pomenuti metod planiranja eksperimenta i obrade rezultata eksperimenta. Optimizacija parametra TMS u opštem slučaju sadrži sledeće procedure: proučavanje objekta, sastavljanje i izbor matematičkog modela, prikupljanje numeričkih vrednosti ulaznih podataka i obezbeđenje njihovog upoređivanja, algoritmizaciju i programiranje za CAD i analizu rezultata proračuna ili eksperimenta. Osnovni zahtevi Software za optimizaciju su: sistem model i sistem algoritam. Sistem model podrazumeva skup odnosa ograničenja i funkcija, koji objašnjava sistem u njegovom maksimalno mogućem približenju. Sistem algoritama predstavlja tačan raspored matematičkih i logičkih operacija koje su nužne za rešenje zadatka. Za rešavanje problema optimizacije TMS koristi i metod sistem analize i višekriterijalnog odlučivanja, koji počiva na matematičko-kibernetičkoj teoriji odlučivanja.

Poslednji blok aktivnosti, vezan za dijagnostiku, obradjuje se u uvodnim člancima u prethodnim brojevima ovog časopisa.

Institut MFK Laboratorijs za tribologiju treba da sproveđe stručnu raspravu o ovom aktuelnom problemu projektovanja TMS.

Obaveštenje

S obzirom da smo prešli na nov način uređivanja i štampanja časopisa TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI to smo u zakašnjenuju sa izlaskom prvog broja.

Izvinjavamo se našim cenjenim čitaocima što časopis nisu dobili u predviđenom roku.

Sigurni smo da je podizanje kvaliteta časopisa razlog koji nas opravdava.

Redakcija



ISTRAŽIVANJA

B. IVKOVIĆ

UDK 621. 9. 015. 004. 6

Razmatranje mogućnosti određivanja obradivosti materijala preko postojanosti alata merenjem otpora rezanjem

1. UVOD

Indeks obradivosti materijala pri obradi rezanjem moguće je formirati na više načina, odnosno sa više aspekata. Osnovni pristup formiranju odnosa između obradivosti dva materijala zasniva se na poznavanju razvoja procesa habanja alata u toku rezanja i krivih habanja $h = f(T)$. Primenom odgovarajućeg (izabaranog) kriterijuma pohabanosti alata dobijaju se iz eksperimentalnih krivih habanja postojanosti alata T_1 i T_2 . Njihov količnik predstavlja indeks obradivosti jednog materijala u odnosu na drugi sa gledišta postojanosti alata. Kako od veličine postojanosti alata odnosno kako od intenziteta razvoja procesa habanja zavisi nivo ekonomične brzine rezanja u određenim uslovima obrade i nivo troškova obrade, to indeks obradivosti formiran na ovaj način ima izuzetan značaj za upravljanje procesima rezanja u obradnim sistemima.

Do eksperimentalnih krivih habanja, međutim, dolazi se veoma teško uz utrošak vrlo velikog vremena rada, velike količine materijala i alata. Ovo je osnovni razlog zbog koga se već godinama razvijaju u raznim istraživačkim institucijama postupci kojima bi se smanjili troškovi dobijanja eksperimentalnih krivih habanja. Nažalost, i pored velikih napora učinjenih do sada u brojnim istraživačkim laboratorijama instituta i univerziteta širom sveta, još uvek nismo u mogućnosti da prihvatimo ni jedan metod kao dovoljno pouzdan i ako jedan broj razvijenih postupaka mogu u određenim uslovima da daju relativno dobre rezultate. Istraživačka metoda razvijena na osnovu primene površinske aktivacije tankog sloja materijala ispod ledjne površine reznog klina alata (TLA) najблиže je po mišljenju autora rešenje ovog problema ali njena šira primena zbog malih mogućnosti ozračivanja alata i straha od rada sa radioaktivnim materijalima ma kako niske radioaktivnosti bile nije uvek moguća.

Indeks obradivosti materijala pri obradi rezanjem formiran je na osnovu merenja otpora rezanja, temperature rezanja i

hrapavosti obradjene površine govore o obradivosti materijala sa odgovarajućih aspekata (utroška energije, razvijene toplove, kvaliteta obradjene površine) koji mogu da budu od posebnog interesa u pojedinim proizvodnim operacijama odnosno u odgovarajućim uslovima obrade.

Poslednjih godina razvojem savremene merne instrumentacije omogućeno je vrlo precizno merenje raznih komponenti rezultujućeg otpora rezanja pri svim vrstama obrade metala rezanjem. Istraživački programi koji se realizuju u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu sa ciljem formiranja baza podataka u Tribološkom informacionom sistemu o obradivosti materijala predmeta obrade i tribološkim karakteristikama alata i sredstava za hladjenje i podmazivanje ukazuju na značajnu zavisnost glavnog otpora rezanja pri struganju, npr. od stepena pohabanosti alata.

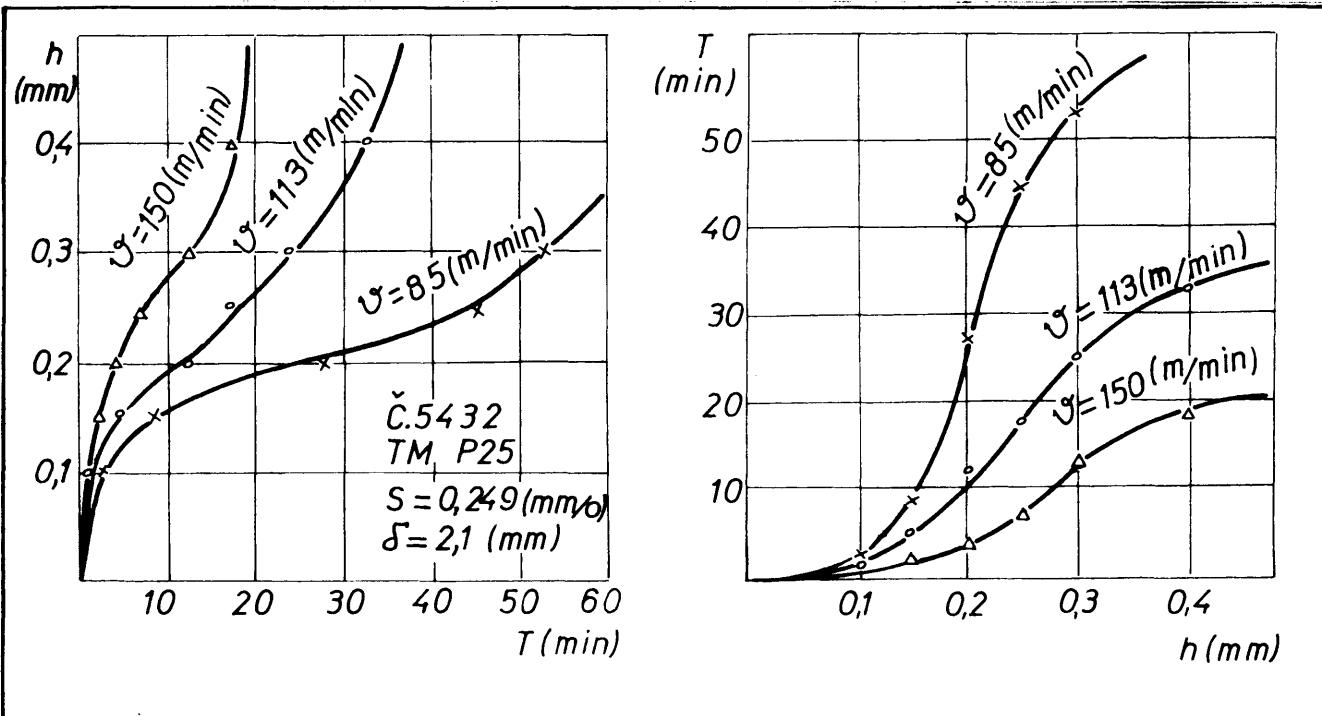
U ovom radu razmatra se mogućnost formiranja funkcije $T = f(h)$ na osnovu eksperimentalnim putem dobijene veze između porasta glavnog otpora rezanja pri obradi na strugu i veličine pohabanosti alata, odnosno, uspostavljanja odnosa između indeksa obradivosti sa aspektom postojanosti alata i indeksa obradivosti sa aspektom otpora rezanja.

2. EKSPERIMENTALNE FUNKCIJE $T = f(h)$ I $F_1 = f(h)$ DOBIJENE PRI OBRADI STRUGANJEM

U brojnim institucijama i kod nas i u svetu izvodjeni su programi istraživanja da bi se dobole eksperimentalnim putem krive habanja odnosno funkcije $h = f(T)$ ili $T = f(h)$ i krive koje pokazuju promenu veličine glavnog otpora rezanja pri promeni stepena pohabanosti alata $F_1 = f(h)$ pri čemu je parametar habanja „ h “ bila najčešće širina pojasa habanja na ledjnoj površini reznog klina alata. Kako je broj faktora obrade koji utiču na oblik i položaj ovih funkcija u odgovarajućim koordinatnim sistemima a posebno funkcije h

$= f(T)$ veoma veliki, to je dobijen i veliki broj različitih krivih habanja. Međutim, sve krive habanja mogu da se

Č.5432 sa tri brzine rezanja alatima od tvrdog metala u Institutu za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka

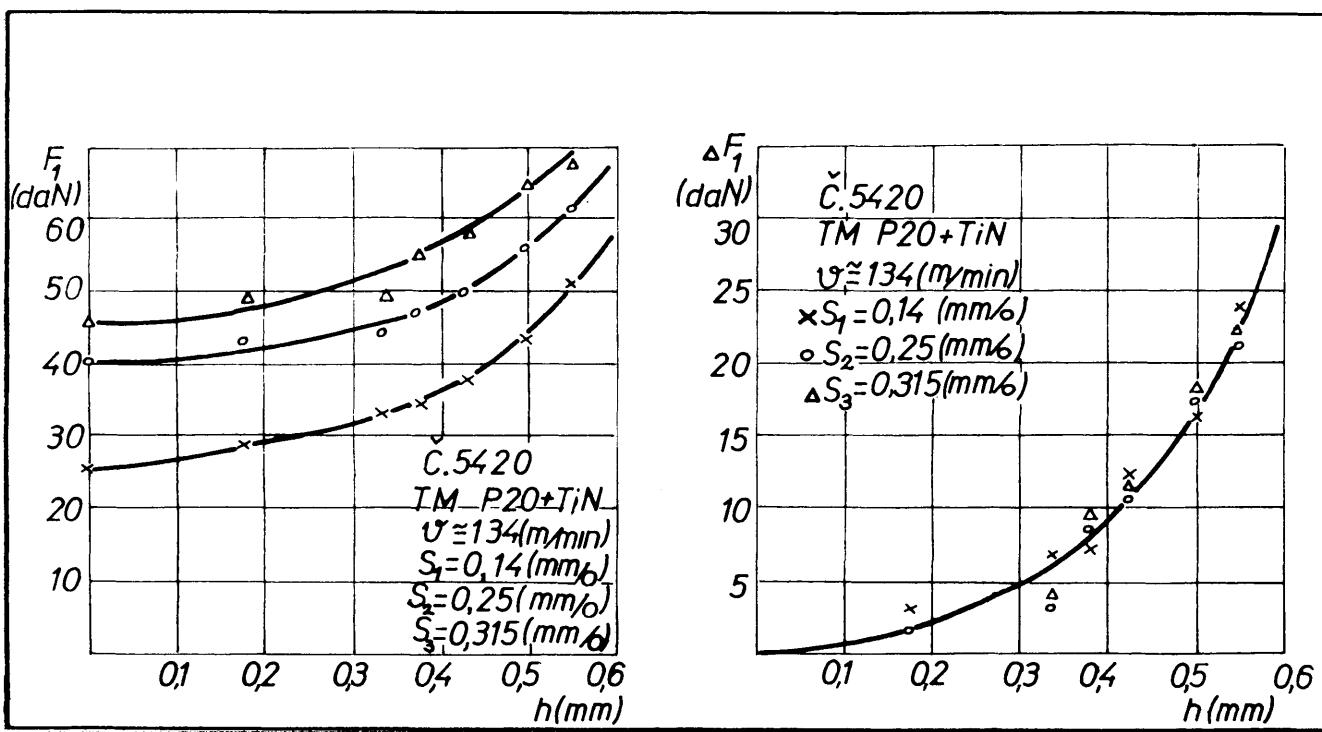


Slika 1.

Krive habanja dobijene pri obradi na strugu čelika Č.5432

aproksimiraju sa dve parabole od kojih se prva odnosi na prvu fazu habanja a druga na drugu fazu habanja. Na slici 1. prikazana je, primera radi, grupa krivih habanja dobijena eksperimentalnim putem pri obradi na strugu legiranog čelika

u Novom Sadu. Eksperimentalni rezultati omogućili su konstruisanje i odgovarajućih funkcija $T = f(h)$ prikazanih na istoj slici (sl. 1.b).



Slika 2.

Glavni otpor rezanja i njegov rast u funkciji širine pojasa habanja na ledjnoj površini reznog klina alata

Prva faza razvoja procesa habanja koja se završava na veličinu pohabanosti alata definisanoj sa $h = 0,3$ mm može da se aproksimira sa parabolom oblike

$$h = C_1 T^z \text{ odnosno } T = K_t h^u$$

Primenom odgovarajućih metoda aproksimacije dobijaju se veličine konstanti C_t i K_t i eksponenata z_t i u_t .

Krive habanja dobijaju se eksperimentalnim putem najčešće korišćenjem mikroskopske metode koja traži utrošak dosta vremena, materijala i alata. Međutim, za odredjene uslove obrade (materijal, režim rada, sredstva za hladjenje i podmazivanje i sl.) krive habanja dobijene ovom metodom u različitim institucijama pokazale su se identične.

Istraživački programi kojima su merene sile rezanja da bi se dobili empirički izrazi za njihov proračun takodje su bili brojni i često izvodjeni ali se rezultati dobijeni u različitim institucijama ponekad veoma mnogo razlikuju. U literaturi rezultati iz ove oblasti su po pravilu različiti naročito u oblasti uticaja pojedinih faktora obrade posebno veličine pohabanosti alata na veličinu sile odnosno otpora rezanjem i to ne samo pri obradi na strugu već i u drugim vrstama obrade. Osnovni razlog za postojanje razlika u rezultatima merenja otpora rezanja u svim vrstama obrade metala rezanjem nalazi se u korišćenju dinamometara različite osetljivosti i prateće instrumentacije različitog nivoa pouzdanosti. Proučavanju uticaja pohabanosti alata na veličinu svih komponentnih rezultujućeg otpora rezanja u svim vrstama obrade poklanja se poslednjih godina velika pažnja u istraživačkim programima koji se realizuju u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu.

Na sl. 2 prikazana je veza između glavnog otpora rezanja i njegovog rasta i pohabanosti alata dobijena pri obradi

legiranog čelika Č.5420 na strugu alatima od tvrdog metala P.20.

Obradom rezultata istraživanja uticaja pohabanosti alata na veličinu glavnog otpora rezanja pri struganju došlo se do zaključka da najbolju korelaciju daje funkcija oblike

$$F = C_F h^{(C_1 + C_2 S)h^2}$$

C_F - konstanta čija veličina zavisi od vrste materijala predmeta obrade, dubine rezanja, brzine rezanja, koraka i drugih faktora koji definišu uslove pod kojima se rezanje izvodi,

s - korak po obrtaju u mm/o,

h - širina pojasa habanja na ledjnoj površini reznog klin alata (srednja).

Uspostavljanjem veze između postojanosti alata u funkciji pohabanosti $T = f(h)$ i funkcije $F_1 = f(h)$ u ovom obliku nije moguće primenom matematičkog aparata. Međutim, ako se formira funkcija $\Delta F = f(h)$ onda se stvara mogućnost uspostavljanja veza između postojanosti alata F i porasta otpora rezanja ΔF koji je u funkciji stepena pohabanosti h . Na sl. 2. prikazano je nekoliko eksperimentalnim putem dobijenih funkcija $\Delta F = f(h)$ pri obradi na strugu. Ove funkcije pokazuju kako raste glavni otpor rezanja pri porastu pohabanosti alata definisane parametrom habanja h koji predstavlja širinu pojasa habanja na ledjnoj površini reznog klin alata.

Kao što iz slike 2. proizilazi funkcija $\Delta F = f(h)$ može da se aproksimira parabolom oblike

$$\Delta F = K_f h^u$$

*Ukoliko želite da kompletirate
sva godišta časopisa
TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI
nudimo Vam brojeve
koji Vam nedostaju*

Obratite se redakciji

gde su: K_f i u_f konstanta i eksponent čije veličine zavise od uslova pod kojima se proces rezanja izvodi. Rezultati eksperimentalnih istraživanja izvedeni do sada pokazuju da je $u_f > 1$, što nije u saglasnosti ni sa jednim brojem informacije koja se o promeni krive rezanja sa promenom habanja nalaze u literaturi posebno nešto starijeg datuma.

Izraz za glavni otpor rezanja u funkciji pohabanosti alata može da se napiše i u obliku

$$F_1 = F_0 + K_f h^{u_f}$$

koji je mnogo pogodniji za korišćenje u praksi posebno za uspostavljanje veze izmedju postojanosti alata i otpora rezanja.

3. MOGUĆE VEZE IZMEDJU FUNKCIJA

$$T = f(h) \text{ I } \Delta F = f(h)$$

Poznavanjem funkcija $T = f(h)$ i $\Delta F = f(h)$ moguće je doći do izraza za vezu izmedju postojanosti alata i porasta glavnog otpora rezanja sa porastom habanja.

$$T = K_t h^{u_t} \quad h = \left(\frac{\Delta F}{K_f} \right)^{\frac{1}{u_f}}$$

$$\Delta F = K_f h^{u_f} \quad T = K_t \left(\frac{\Delta F}{K_f} \right)^{\frac{u_t}{u_f}}$$

Da bi se odredila postojanost alata u određenim uslovima obrade (materijal predmeta obrade, SHP, brzine rezanja, korak, dubina rezanja itd.) na osnovu merenja porasta otpora rezanja F neophodno je poznavati pored funkcije $F = K(f)h^{u_f}$ i konstante K_t i eksponent u_t odnosno neophodno je poznavati krivu habanja za odredjene uslove obrade. Očigledno je da merenjem F nije moguće dobiti postojanost alata ni za kriterijum pohabanosti koji definiše kraj prve faze habanja. Međutim, uz aproksimaciju (preplate) da je za grupu istih vrsta materijala predmeta obrade, na primer, za grupu ugljeničnih čelika ili grupu legiranih čelika moguće aproksimirati krive habanja parabolama sa jednakom veličinom eksponenata u_q i različitim konstantama K_t odnosno uz aproksimaciju da su krive habanja za grupu čelika iste vrste paralelne medju sobom u koordinatnom sistemu $\log T$, $\log h$ (sl. 3) moguće je razviti postupak za definisanje obradivosti konstrukcijskih materijala na osnovu postojanosti alata i formiranjem funkcije $T = f(F)$.

Na sl. 3. prikazane su prve faze habanja alata pri obradi tri vrste čelika sa tri različite brzine rezanja konstruisane sa jednom veličinom eksponenta u_t i različitim konstantama K_t . Maksimalna greška koja se pravi ovom aproksimacijom izmedju eksperimentalnim putem dobijenih rezultata merenjem i rezultata dobijenih iz krive habanja manje je od 10 %. Ovo ukazuje na mogućnost prihvatanja konstantne vrednosti eksponenta u i za više vrsta čelika što treba proveriti daljim eksperimentalnim istraživanjima ove vrste.

4. MOGUĆI PRILAZ DEFINISANJU OBRADIVOSTI GRUPE ČELIKA MERENJEM PORASTA OTPORA REZANJEM SA PORASTOM HABANJA ALATA

Polazeći od formiranih veza izmedju postojanosti alata i porasta otpora rezanja sa jedne strane i porasta habanja na lednjoj površini reznog klini alata sa druge strane, moguće je razviti postupak za definisanje obradivosti konstrukcijskih materijala na osnovu merenja samo porasta otpora rezanja pri različitim veličinama pohabanosti alata h .

$$T = K_t \left(\frac{\Delta F}{K_f} \right)^{\frac{u_t}{u_f}}$$

$$T = \frac{K_t}{K_f^{u_t/u_f}} \Delta F^{\frac{u_t}{u_f}}$$

Ako se eksperimentalnim putem (obradom struganjem npr.) ustanovi da se posle vremena rezanja T_1 na lednjoj površini reznog klini alata uspostavi širina pojasa habanja $h = 0,1$ mm, onda bi to bilo sasvim dovoljno da se merenjem otpora rezanja za pohabanost alata od $h = 0,1; 0,2; 0,3$ dodje do veličine postojanosti alata koja odgovara veličini pohabanosti alata od $h = 0,3$ mm.

$$T_{0,1} = \frac{K_t}{K_f^{u_t/u_f}} \Delta F_{0,1}^{\frac{u_t}{u_f}}$$

$$T_{0,3} = \frac{K_t}{K_f^{u_t/u_f}} \Delta F_{0,3}^{\frac{u_t}{u_f}}$$

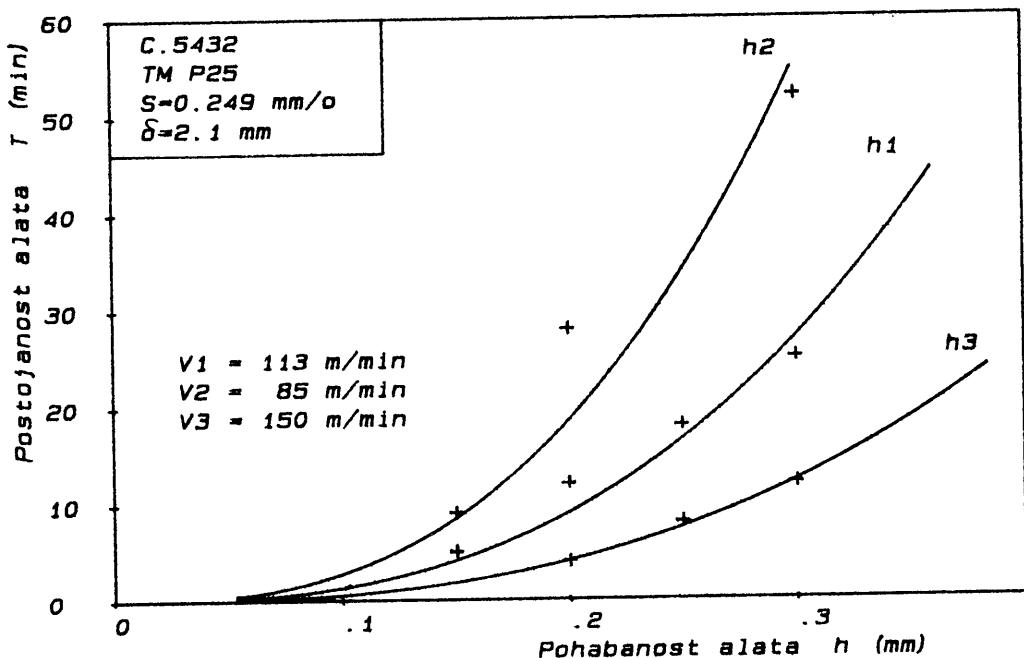
$$T_{0,3} = T_{0,1} \left(\frac{\Delta F_{0,3}}{\Delta F_{0,1}} \right)^{\frac{u_t}{u_f}}$$

Kako je eksponent u_t poznat iz ranije obavljenih ispitivanja za grupu čelika, to ostaje da se eksperimentalnim putem dodje do eksponenta u_f tj. do funkcije $\Delta F = f(h)$ za sve čelike čija se obradivost meri.

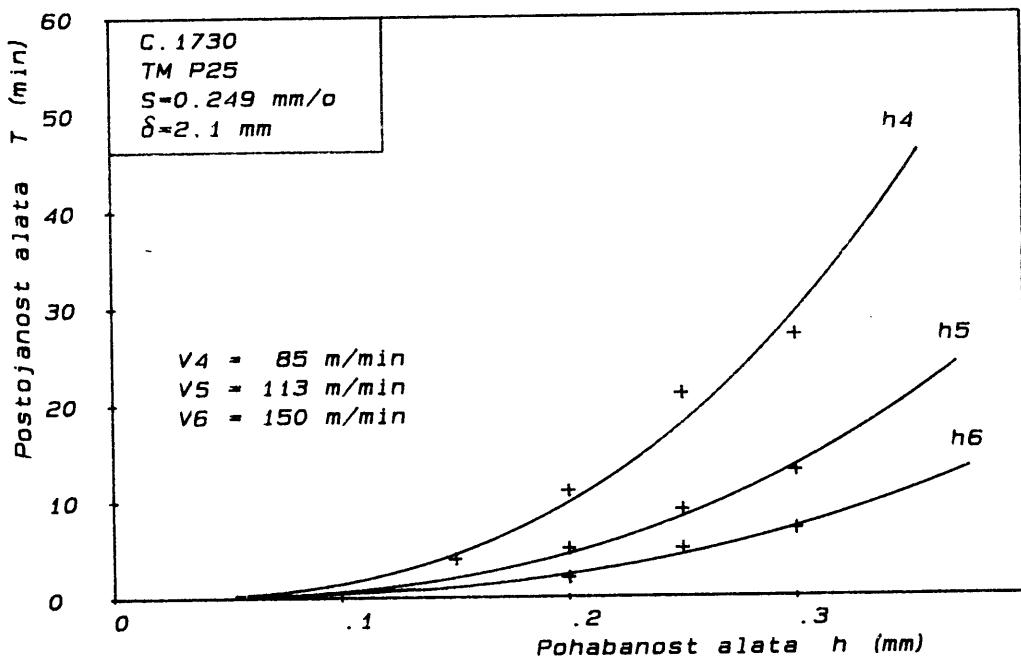
Formiranje funkcije $\Delta F = f(h)$ ne zahteva utrošak ni mnogo vremena ni mnogo materijala. Ono što je potrebno to je alat sa različitim stepenima pohabanosti. Kada se definiše obradivost pri obradi na strugu, onda je dovoljno imati reznu pločicu sa šest reznih ivica, od kojih je svaka pohabana do različitog nivoa pohabanosti (od 0,1 do 0,6 npr.). Sa ovim alatom moguće je formirati veliki broj funkcija $\Delta F = f(h)$ a ukupno vreme rezanja za jednu eksperimentalnim putem dobijenu funkciju ove vrste iznosi oko 0,1 min.

Sa drugim alatom koji takođe ima šest sečiva (trouglasta pločica na klinu) moguće je izvršiti šest eksperimenta obradom šest vrsta čelika do pojave habanja alata od najviše 0,1 mm što zahteva relativno mali utrošak i materijala i vremena.

Pri određivanju obradivosti šest vrsta čelika, npr., po ovoj metodologiji program istraživanja sastoji se iz dva dela.

DIJAGRAM $T - h$ 

$$T_1 = 697 h^{2.7} \quad . \quad T_2 = 1426 h^{2.7} \quad . \quad T_3 = 317 h^{2.7}$$

DIJAGRAM $T - h$ 

$$T_4 = 755 h^{2.7} \quad . \quad T_5 = 350 h^{2.7} \quad . \quad T_6 = 186 h^{2.7}$$

Slika 3.
Krive habanja za prvu fazu grupe čelika

MATERIJAL PREDMETA OBRADE	SEČIVO N°	ŠIRINA POJASA HABANJA h u mm	VREME REZANJA T u min
M1	1		10
M2	2		
M3	3		
M4	4		
M5	5		
M6	6		

Tablica 1.

Postojanost alata i parametar habanja „h“.

U prvom delu programa vrši se obrada svakog čelika do pohabanosti alata od $h = 0,1$ mm. Rezultati merenja pohabanosti alata sa vremenom rezanja unose se u tablicu 1.

Ukupno vreme rezanja za obradu svih šest čelika iznosi 52 min.

Uslovi pod kojima se obrada svih čelika izvodi su konstantni i definisani sa:

Brzina rezanja	125 m/min
Korak po obrtaju	0,12 m/min
Dubina rezanja	1,5 mm
SHP - polusintetičko mineralno emulgirajuće ulje	

Prema ranijim istraživanjima eksponent pojasa habanja u funkciji $T = f(h)$ za ovu grupu čelika iznosi $u_t = 0,37$

U drugom delu programa sa alatom koji je prethodno pohaban do različitog nivoa na svakom od šest sečiva ($0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$) vrši se obrada svih šest čelika sa svakim reznim elementom posebno i pri tome meri glavni otpor rezanja F_1 . Na ovaj način za svaki čelik se dobija eksperimentalna funkcija $F_1 = f(h)$. U tablici 2 ispisuju se rezultati merenja ostvareni u drugom delu programa istraživanja obradivosti šest vrsta čelika.

I u ovom delu programa ispitivanja obrada se vrši u istim uslovima kao i u prvom delu programa ispitivanja. Ukupno

Obradom rezultata istraživanja dobija se vrednost eksponenta u_f za slučaj obrade svakog od šest vrsta čelika. Poznavanje eksponenata u_f i u kao i porasta otpora rezanja za pohabanost alata od $h = 0,1$ do $h = 0,3$ omogućava proračun postojanosti alata za kriterijum pohabanosti definisan sa $h = 0,3$.

U tablici 3 upisuju se podaci neohodni za formiranje indeksa obradivosti sa aspekta postojanosti alata i otpora rezanjem kao i indeksi obradivosti izračunati sa oba aspekta.

MATERIJAL PREDMETA OBRADE	$T_{0,1}$	$T_{0,3}$	$F_1^{0,3}$	I_T	I_F
M1				100	100
M2					
M3					
M4					
M5					
M6					

Tablica 3.

Indeksi obradivosti sa aspekta postojanosti alata i otpora rezanja

5. ZAKLJUČAK

Mogućnost preciznog merenja porasta otpora rezanja sa porastom habanja alata savremenom mernom instrumentacijom omogućava i dolaženje do indeksa obradivosti više konstrukcijskih materijala na osnovu merenja otpora rezanja i postojanosti alata do pojave širine pojasa habanja na lednjoj površini reznog klina od $h = 0,1$ mm.

Preloženi postupak formiranja indeksa obradivosti sa gledišta otpora rezanja i sa gledišta postojanosti alata koja se ostvaruje u prvoj fazi habanja daje mogućnost da se sagleda i obradivost materijala sa gledišta postojanosti korишћenjem skraćenog programa ispitivanja u kome se ne troši ni mnogo materijala ni mnogo vremena. Ako se definise obradivost materijala za proizvodne operacije u kojima se vrši završna obrada struganjem, npr. i u kojima je kriterijum pohabanosti alata definisan sa najviše $h = 0,4$ mm, onda je primena ovog postupka definisane obradivosti dosta optimalna i daje realne rezultate. Međutim, za operacije u kojima se vrši obrada grubog struganja odnosno u kojima se kriterijum pohabanosti alata definiše sa $h = 0,8$ do 1 mm postojanosti alata su mnogo veće od onih koje se ostvaruju u prvoj fazi habanja pa je prema tome i obradivost sa aspekta postojanosti alata definisan ovom metodologijom dosta nerealan i nedovoljan.

LITERATURA

1. B. Ivković, Tribologija rezanja, Građevinska knjiga, Beograd, 1979.
2. M. Gostimirović, D. Milkić, L. Šidanin, Uticaj stanja materijala obrade na habanje reznog alata, YUTRIB-89, Kragujevac, 1989.
3. B. Tadić, B. Nedić, Ispitivanje uticaja pohabanosti alata na veličinu otpora rezanja u obradi struganjem, YUTRIB-89, Kragujevac, 1989.

Tablica 2.

Otpor rezanja u funkciji pohabanosti alata

vreme obrade svih šest čelika u ovom delu eksperimentalnog programa kreće se oko 3 min.

S. TANASIJEVIĆ

Tribologija u konstruisanju

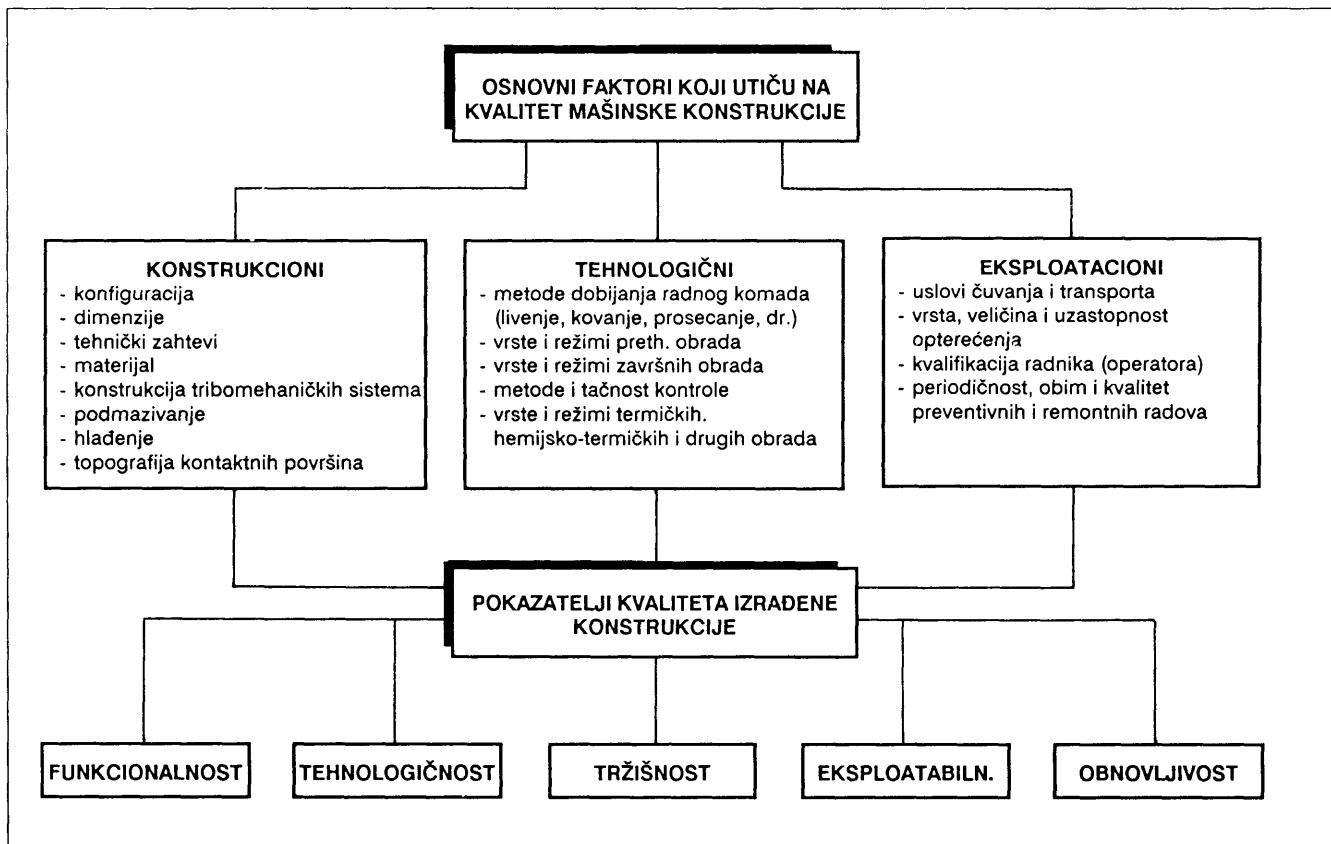
1. UVOD

Konstruisanje mašina i mehanizama, a posebno mašinskih sistema, u smislu njihovog oblikovanja, ima značajan uticaj na trenja i habanje tribomehaničkih sistema. Uticaj oblikovanja i geometrije na tribološke procese u sistemima je saznanje čije uzročno-posledične veze nisu ni do danas čak ni skromno istražene. Opasna su shvatanja koja se još i danas susreću, po kojima se smatra da je za ispravljanje greške u mašinskoj konstrukciji sasvim dovoljan izbor odgovarajućeg maziva.

Savremena saznanja nauke o konstruisanju još uvek u procesu konstruisanja ne uključuju dovoljno i tribološke aspekte konstruisanja, pa je kod nas još uvek malo poznat termin

„tribološki ispravna konstrukcija“, čak i u fazi analize delova i sklopova. Principi savremenog kostruisanja zahtevaju pouzdani prenos sila i opterećenja preko kontaktnih površina u relativnom kretanju. Tribološki ispravno konstruisanje uslovljava da izvedena konstrukcija pored pouzdanog rada bude bezbedna i u pogledu habanja, čak i u ekstremnim uslovima eksplatacije. Optore trenja pri tome treba minimizirati, ali ni u kom slučaju do te mere da bi došlo do ugrožavanja sigurnosti konstrukcije.

Tribološki aspekti konstruisanja i tribologija u konstruisanju je neminovnost ispravnog konstruisanja. Skromni pokušaji činjeni do danas uslovjeni su malim brojem dostupnih informacija, kao i nepostojenjem tribološke banke podataka. U godinama koje dolaze treba očekivati da će ispravnog konstruisanja biti sve više.



Slika 1.

2. KVALITET MAŠINSKE KONSTRUKCIJE

Kvalitet mašinskih konstrukcija i drugih tehničkih sistema, može se analizirati i ocenjivati različitim prilazima ili metodama. Izvesno je da u svim prilazima kvalitet mora da se tretira kao veoma složen pojam koji obuhvata niz relativnih raznorodnih osobina sistema, tehničkog i ekonomskog karaktera. Takođe je bitno da se kvalitet mašinske konstrukcije mora posmatrati tokom celog životnog ciklusa tj. veka trajanja. Iz tih razloga, kvalitet mašinske konstrukcije treba izražavati pomoću dovoljno kompleksne karakteristike koja jednoznačno opisuje sve bitne osobine konstrukcija i tokom celog veka trajanja.

Definisanje pojma kvaliteta neke mašinske konstrukcije je veoma kompleksno, jer je tumačenje samog pojma veoma relativno i zavisi od zahteva tržišta, kupovne moći potrošača i drugih faktora. Može se ipak reći da je kvalitet jednog

Na kvalitet konstrukcije utiče veliki broj faktora, svrstanih u tri velike grupe: konstrukcionih faktora, faktora tehnologičnosti i eksploracionih faktora (sl. 1). Analiza blok-scheme na sl. 1 pokazuje da na ukupan kvalitet izradjenje konstrukcije utiče kvalitet konstruisanja, kvalitet izrade (tehnologičnosti) i kvalitet eksploracije.

Posebna pažnja se pri konstruisanju, izradi i eksploraciji posvećuje tribomehaničkim sistemima mašinske konstrukcije, odnosno onim tehničkim sistemima u kojima se ostvaruje kontakt opterećenih pri njihovom relativnom kretanju. Oni su, po pravilu, najvitalniji sklopovi tehničkog sistema, koji često definišu kvalitet i vek trajanja mašinske konstrukcije. Tribološki procesi koji se javljaju u ovakvim sistemima neizostavno zahtevaju da se pri konstruisanju i izradi, u potreboj meri uključe i tribološki aspekti konstruisanja.

Tribološki ispravna konstrukcija povećava nivo kvaliteta izradjene konstrukcije i obogaćuje osnovne principe ispravnog konstruisanja.

3. FUNKCIJA TRIBOMEHANIČKIH SISTEMA

Tribomehanički sistem se određuje kao funkcionalno određena celina sa uzajamno delujućim kontaktnim površinama pri relativnom kretanju. Tehnička primena pokretnih površina obuhvata široki dijapazon od aerokosmičkih objekata do biomehaničkih sastava, ali sa fizičke tačke gledišta moguće je izdvojiti četiri osnovne grupe tehnički određenim sistemima (sl. 2) /4/.

Veliki broj opštih, tehnički određenih tribomehaničkih sistema primenjuje se u obezbeđenju kretanja u osloncima vratila (različiti tipovi ležišta), (sl. 2a).

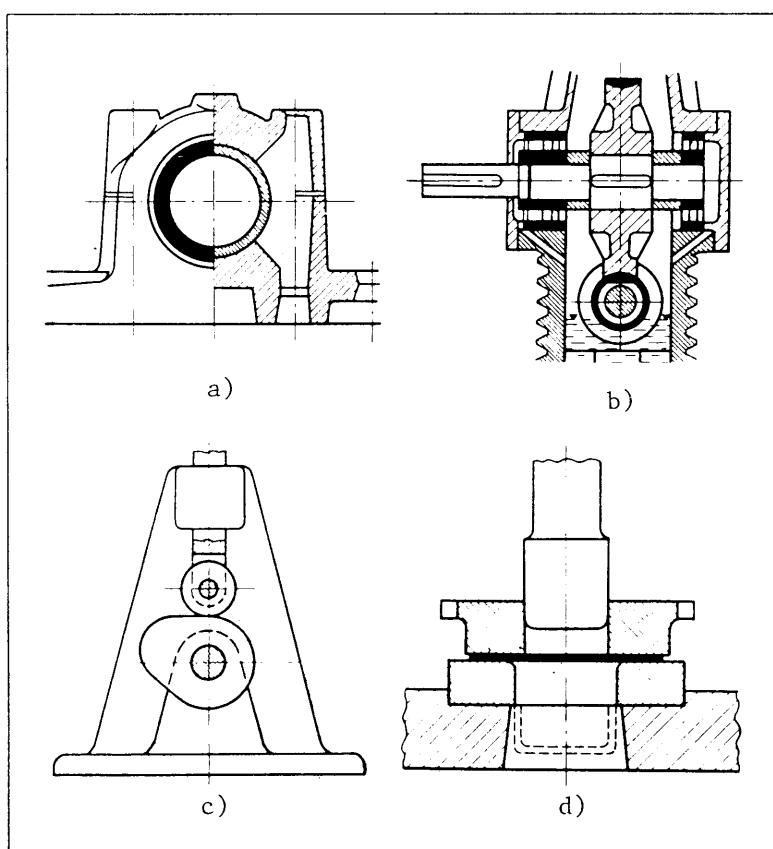
Druga osnovan grupa su prenosnici mehaničkog rada (sve vrsta mehaničkog prenosa i dr.) (sl. 2b).

Prenosnici informacija sačinjavaju treću grupu (upravljanje funkcijama mašina bregastim mehanizmima, davači videosignalova, električni kontakti i dr.) (sl. 2c).

Četvrtu osnovnu grupu čine tribomehanički sistemi u oblasti oblikovanja materijala (presovanje, livenje, izvlačenje i dr.) (sl. 2d).

Osnovna klasifikacija tribomehaničkih sistema u četiri osnovne grupe se može razviti u veliki broj tribomehaničkih sistema u kojima se javljaju procesi trenja, habanja i podmazivanja. Oni čine osnovni sastav konstrukcije i po njima se najčešće klasificira i određuje kvalitet i pouzdanost proizvoda.

U apstraktном i zнатно uporšćenom opisu, funkcija različitih tribomehaničkih sistema sastoji se uglavnom u pretvaranju



Slika 2.
Tipovi tribomehaničkih sistema

industrijskog proizvoda merilo njegove upotrebljivosti, odnosno njegovog ispunjavanja zahteva korisnika.

Danas se u vrednovanju i oceni kvaliteta jedne mašinske konstrukcije mogu koristiti različiti kompleksni parametri, od kojih su možda najkarakterističniji: funkcionalnost, tehnologičnost, tržišnost, eksplorabilnost i obnovljivost (sl. 1). Svakako da ovi pokazatelji u sebi uključuju i druge, ne manje važne pokazatelje, kao: vek trajanja, estetski izgled, ekonomičnost u proizvodnji i eksploraciji i dr.

ulaza (na. pr. kretanja, mehaničke energije i materijala) u koristan za tehničke ciljeve izlaz. Funkcionalni uzročno-posledični odnos između ulaza i izlaza praćen je gubicima mehaničke energije i materijala, definisanih kao gubici na trenje i habanje.

4. HABANJE KAO PARAMETAR KVALITETA MAŠINSKE KONSTRUKCIJE

Habanje je jedan od najznačajnijih pokazatelja valjanosti (kvaliteta) mašinske konstrukcije, odnosno njenih tribomehaničkih sistema. Većina tribomehaničkih sistema povlači se iz upotrebe zbog preteranog habanja. Iz tih razloga veoma je važno unošenje osnovnih principa tribologije još u fazi konstruisanja proizvoda.

Habanje je složen fizičko-hemijski proces na koji utiče veliki broj raznorodnih i kompleksnih faktora, koji je moguće razvrstati u četiri osnovne grupe: eksploatacioni faktori, konstrukcioni faktori, faktori tehnologičnosti i faktori karakteristika operatora (radnika).

Na sl. 3 prikazani su faktori koji u najvećoj meri utiču na habanje tribomehaničkih sistema.

U funkcionalnom smislu zavisnosti između habanja i uticajnih faktora bi se mogla predstaviti u obliku:

$$I = f(E, K, T, O)$$

$$I = f(\underbrace{V, p, \text{tok}, W, Wa, \varepsilon}_{E}; \underbrace{X, Y, z, f, \alpha, \lambda, h, S, t, C, A_N}_{A_r, R, \theta HB; m, \tau} ; \underbrace{T}_{O}; \underbrace{K})$$

gde su:

V - relativna brzina

p - pritisak na kont. površ.

tok - temperatura okoline

W - vlažnost okoline

Wa - prisutnost abraz. čestica

ε - zazor

X, Y, Z, - tekuće koordinate (dimenzije)

f - koeficijent trenja

α - temperaturna provodljivost

λ - koeficijent provodljivosti topote

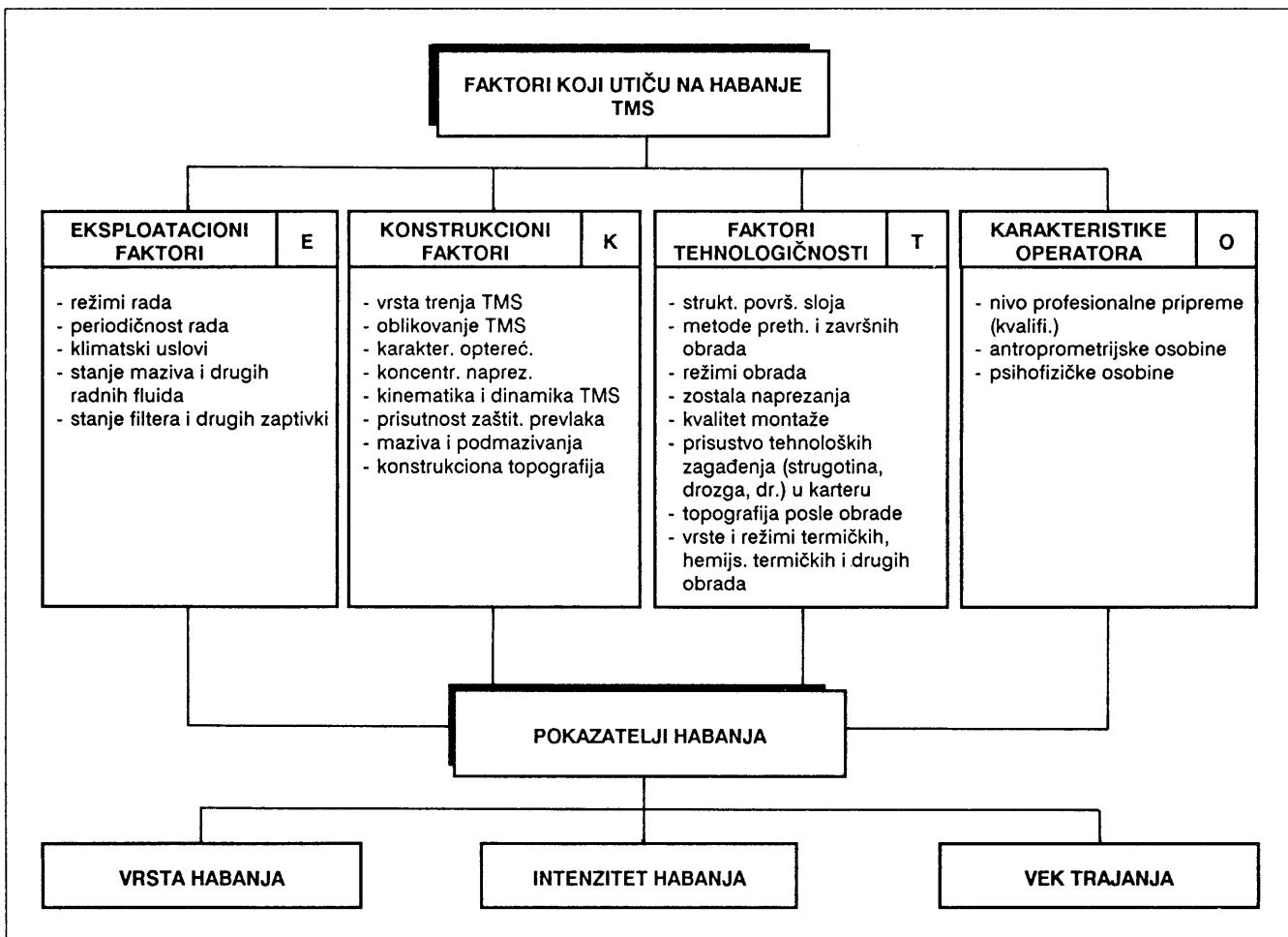
h - debljina uljnog filma

S - površina odavanja topote

t - temper. kontaktnih površina

C - topotni kapacitet

A_N - nominalna površ. kontakta



Slika 3.

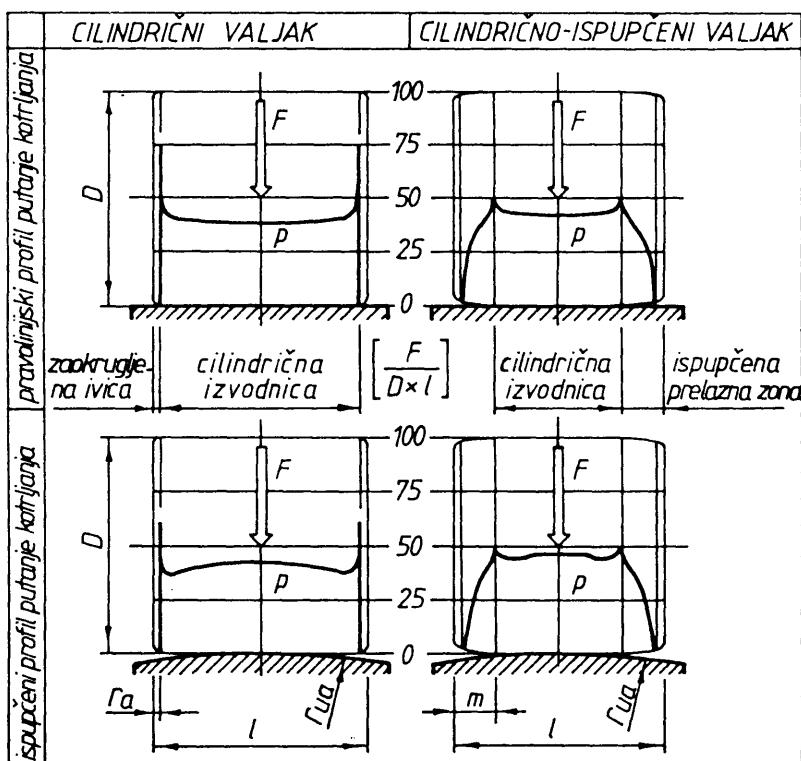
A_r - stvarna površina kontakta
 R - visina mikroneravnina
 θ - ugao nagiba mikroneravnina
 HB - tvrdoča
 m, τ - koeficijent profesionalne kval.

Očigledno da zbog velikog broja faktora i matematička interpretacija procesa habanja je otežana i još uvek nepouzdana.

5. TRIBOLOŠKI ISPRAVNO KONSTRUISANJE

Ispravno konstruisanje tribomehaničkih sistema, sa poštovanjem osnovnih principa tribologije često nije u saglasnosti sa optimalnim zahtevima proizvodnje i kinematike mehaničkih sistema. Osnovni ali i najveći problem konstruktor-a koji u osnovne principe konstruisanja ugradjuje i principi tribologije je - ostvarenje takve konstrukcije u kojoj će uzajamna delovanja i relativna kretanja kontaktnih površina omogućiti prenos sile i kretanja pri minimalnim habanjima kontaktnih površina.

Osnovni pravci u kojima treba razvijati konstrukciju su:



Slika 4.

- 1) Poboljšanje uticaja elastičnih, plastičnih ili termoelastičnih procesa na kontaktnu površinu, posredstvom izmene forme.
- 2) Smanjenje sila, nivelišanje raspodele sila i pritisaka, kao i uticanje na brzinu putem izmene geometrije konstrukcije.
- 3) Izmene kinematike u cilju iznalaženja optimalnog tipa trenja na kontaktnoj površini (trenje klizanja ili trenje

kotrljanja, uzimajući u obzir posledice ovih izmena na proizvodni ciklus).

- 4) Minimiziranje habanja optimalnim planiranjem konstrukcione topografije kontaktnih površina.

5.1. Tribološki ispravno oblikovanje

Analiza blok-dijagrama na sl. 3 pokazuje da na habanje TMS mašinskih konstrukcija utiče veoma veliki broj faktora, a između ostalog i oblikovanje TMS. Uticaj oblikovanja na habanje i vek trajanja mašinske konstrukcije nije ni do danas dovoljno istražen i u optičaju je veoma mali broj korisnih informacija. Na nekoliko narednih primera pokazaćemo kako se modifikacijom elemenata tribomehaničkih sistema može uticati na smanjenje habanja i produžavanje veka trajanja konstrukcije.

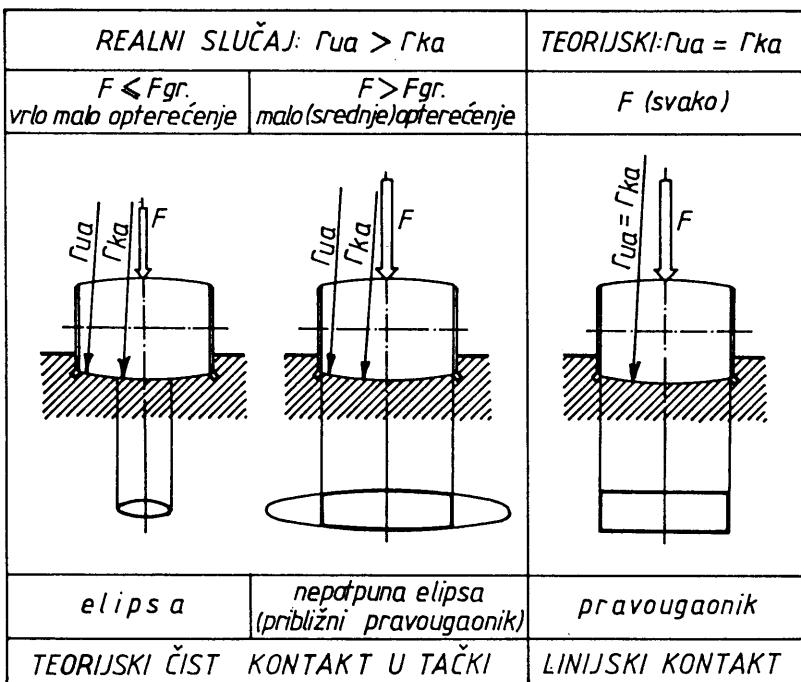
Najčešći konstrukcionalni zahvati kod kotrljajnih ležajeva usmereni su na modifikaciju krivina kotrljajnih tela i putanja kotrljanja spoljašnjeg i unutrašnjeg prstena. U slučaju jednakih krivina kotrljajnih tela i putanja kotrljanja prstena, dodir bi se teorijski u neopterećenom stanju vršio po liniji. Ovakav kontakt moguće je naći kod ležaja sa koničnim i cilindričnim valjcima. Da bi se izbegli pikovi naprezanja koji nastaju u kontaktu cilindra sa oštrim ivicama i putanja kotrljanja, predlaže se izrada izvodnica koničnih i cilindračnih valjaka i (ili) putanja kotrljanja prstena sa ispušćenim profilom (sl. 4). Ovakve izmene obezbeđuju modificirani kontakt i povoljniju raspodelu napona. Sa slike je uočljivo da poseban značaj ima modifikacija kotrljajnih tela /1/.

Kod jednorednih i dvorednih ležaja sa burićima, profil burića je manjeg radijusa krivine od profila putanje kotrljanja. Teorijski dodir kotrljajnih tela i putanje kotrljanja je u tački. Kako je razlika krivina kontaktnih elemenata neznatna, već pri veoma malim opterećenjima ($F < F_{gr}$) zona kontakta je predstavljena elipsom (sl. 5). U slučaju relativno malih (srednjih) opterećenja ($F > F_{gr}$) oblik zone kontakta se samo neznatno razlikuje od oblika svojstvenog slučaju teorijskog linijskog kontakta.

Za ocenu kontakta elemenata tribomehaničkog sistema i uticaja geometrije na habanje kotrljajnih ležaja, opravdano je uvođenje pojma „odnos radijusa“ (odnos krivina):

$$C_{as} = \frac{r_s - r_{ka}}{r_{ka}} \times 100 (\%)$$

$$C_{au} = \frac{r_u - r_{ka}}{r_{ka}} \times 100 (\%)$$



Slika 5.

gde su: c - odnos radijusa; r - radijusi krivine ispučenih putanja kotrljanja; r - radijusi kotrljajnih tela; indeksi: a - u aksijalnoj ravni; s - spoljašnji prsten; u - unutrašnji prsten.

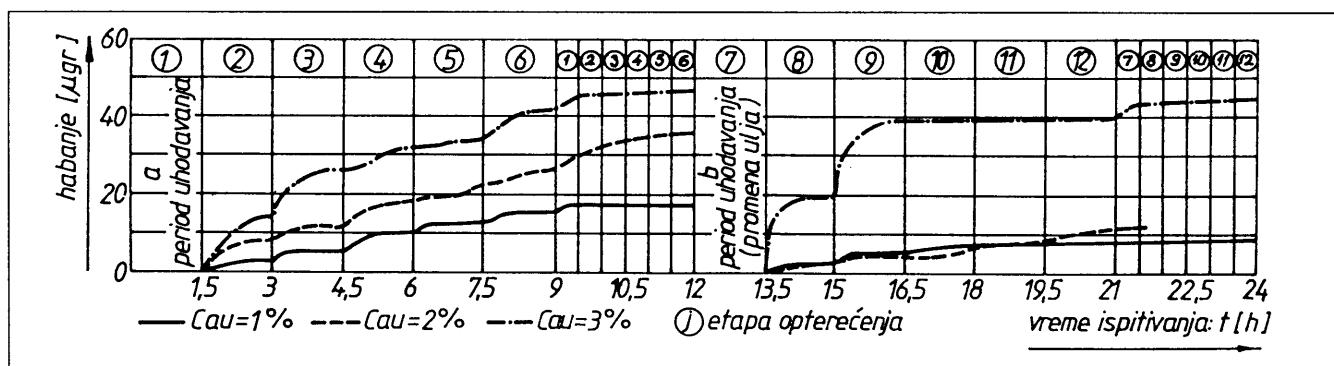
Za ocenu uticaja odnosa radijusa na habanje unutrašnjeg prstena vršena su brojna eksperimentalna ispitivanja metodom radioaktivnih izotopa (sl. 6). Analiza dijagrama na sl. 6 pokazuje da sa porastom veličine C_{au} raste i habanje unutrašnjeg prstena. Uticaj je očigledan i nikako se pri konstruisanju, a ni pri eksploataciji ne može zanemariti.

zivan i da tek nakon uhodavanja dolazi do poboljšanja kontakta izmedju valjaka i prstena.

Valjci sa modifikovanom čeonom površinom i zakošenim spoljašnjim prstenom omogućavaju daleko povoljniji kontakt, bolje podmazivanje i takav ležaj se od samog početka može potpuno opteretiti (sl. 7). Pokazalo se da se uz ove neznatne promene oblika ležaja dopušteno aksijalno opterećenje može povećati za 2,5 puta.

Od velikog broja zaptivaka u mašinskim konstrukcijama se najviše koriste manžetni zaptivaci od elastičnih materijala sa osnovom gume. Radna ivica manžetne, pri obrtanju vratila može trpeti veća opterećenja i pri visokim brzinama vozila, zbog prevelikog zagrevanja zaptivke vrlo brzo propadaju i povlače se iz upotrebe. Na veličinu kontaktnog pritiska utiče prethodni zador površine zaptivanja, pritisak radnih sredina, amplituda i frekvencija vibracija i niz drugih faktora. Pogodnim oblikovanjem kontaktne površine mogu se znatno poboljšati tribološka svojstva zaptivke. Relativna kontaktna površina zaptivke (sl. 8) povećava površinu trenja za približno 2 %, ali i površinu odvodjenja toplote na vratilu za skoro 2 puta u odnosu na klasične zaptivke.

Pri promenljivim opterećenjima i promenljivim vrednostima ugla sprezanja, aktivna površina zuba usled neravnomernog habanja postepeno dobija krivolinijsku formu. Za otklanjanje koncentracije opterećenja u krajevima zuba pravih cilindričnih i koničnih zuba, zub se putem dopunskih obrada na specijalnim mašinama oblikuje tako da dobije formu bureta (sl. 9). Debljina zuba se smanjuje od sredine ka krajevima, pri čemu razlika u debljini leži u granicama 0,02 - 0,04mm. Ovakva forma zuba ne samo da smanjuje habanje i produžava

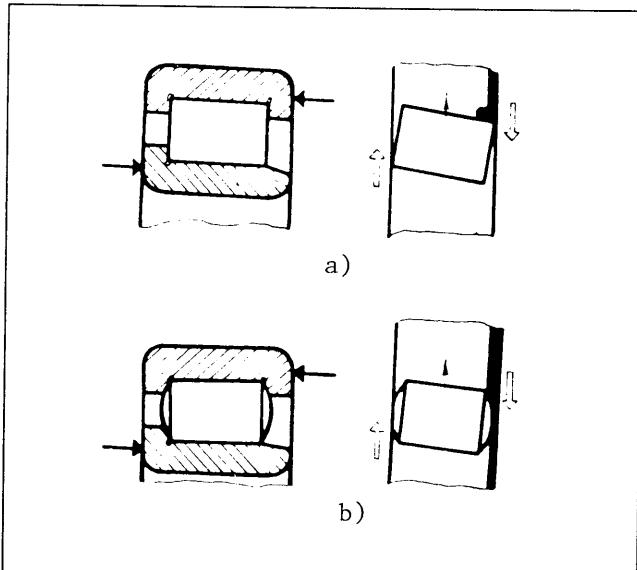


Slika 6.

Modificiranjem valjaka kugličnih ležajeva moguće je znatno poboljšati podmazivanje, povećati aksijalnu nosivost, smanjiti habanje i znatno produžiti vek trajanja. Kod ležajeva sa klasičnim valjcima izmedju valjaka i prstena formira se klin maziva, usled čega standardni valjak skida mazivo i onemogućava dobro podmazivanje (sl. 7). Ispitivanja su pokazala da je period habanja klasičnih ležajeva veoma inten-

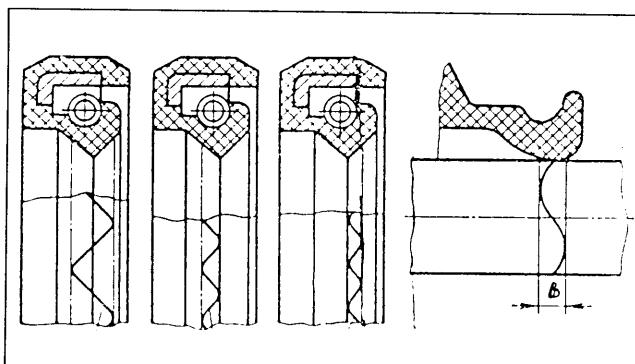
vek nego takođe smanjuje i šum u toku celog rada.

Elementi i sklopovi mašina alatki trebaju imati takvu krutost da netačnost dimenzija i oblika radnog komada, uslovljeni relativnim kretanjima instrumenta i mašinskih sklopova i delovanjem radnih sila, ne izlaze iz okvira propisane tačnosti. Povećanje otpornosti na habanje mašinskih elemenata se



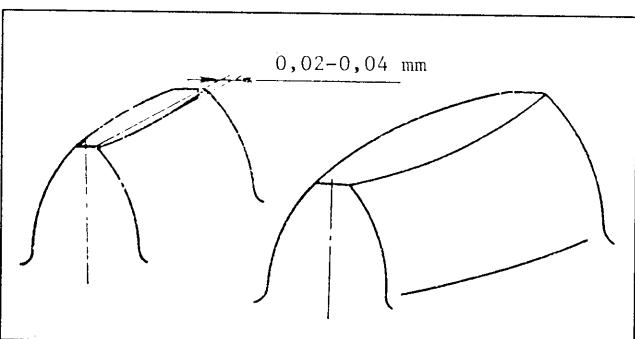
Slika 7.

postiže ne samo opštom, već i pojedinačnom krutošću konstrukcije.



Slika 8.

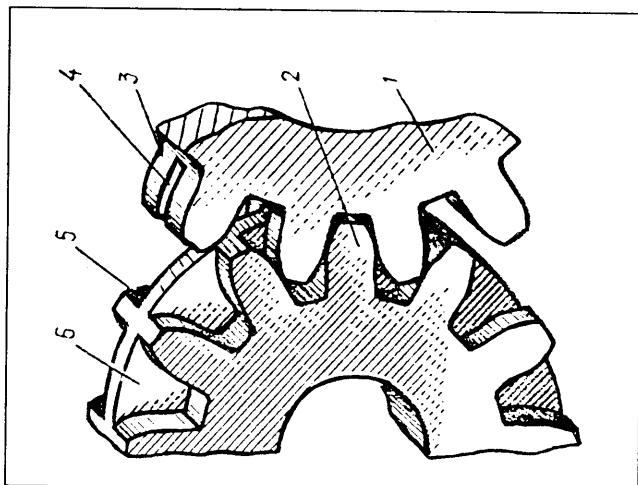
Zupčasti prenosnik povećane krutosti prikazan je na sl. 10, gde su: 1 - gonjeni zupčanik; 2 - pogonski zupčanik; 3 - Zub gonjenog zupčanika sa prorezom 4; 5 - Zub pogonskog zupčanika sa ojačanjem 6.



Slika 9.

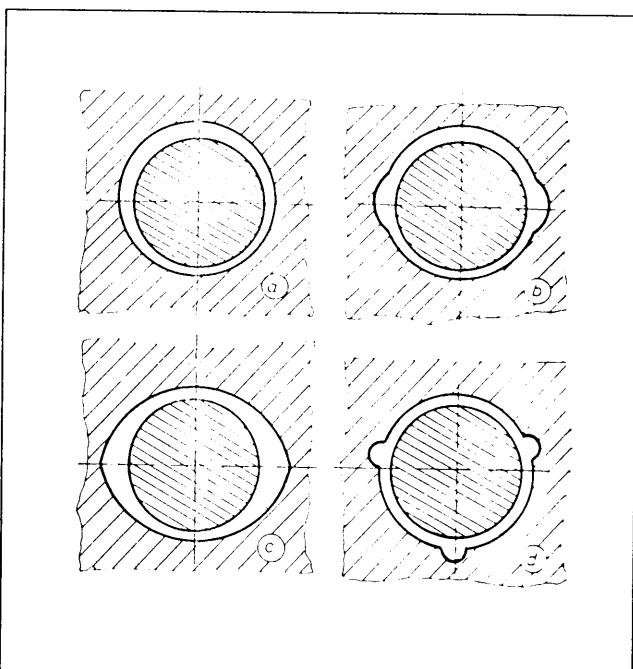
Značaj tribološki ispravnog konstruisanja moguće je pokazati i na primeru kliznog ležišta. Za uspešan i dug rad ležišta

neophodno je obezbediti rad u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja. Hidrodinamičko podmazivanje je takvo podmazivanje u kome su kontaktne površine razdvojene kontinualnim slojem maziva dovoljne debljine da onemogući čist kontakt metala po metalu, izuzev u periodu pokretanja i zaustavljanja. Opterećenje se prenosi slojem maziva odredene moći nošenja, a otpori usled trenja su odredjeni veličinom unutrašnjeg trenja u mazivu.



Slika 10.

Klasične konstrukcije sa cilindričnim oblikom zazora (sl. 11) su manje optimalne jer pod uticajem opterećenja i generalisane toplote(nema specijalnog uredjaja za hladjenje)



Slika 11.

dolazi do naglog pada viskoznosti sredstva za podmazivanje i pogoršanja uslova rada ležišta. Moć nošenja se može povećati oblikovanjem kontaktne površine cilindričnog oblika (uljni džepovi - sl. 11b, c.). Ovakvim oblikovanjem poboljšavaju se sposobnosti odvodnjenja topline i protiv-

habanja svojstva sistema, a obezbeđuje funkcionalnost samog ležišta.

6. ZAKLJUČAK

Sve veći zahtevi da se u mašinama, mehanizmima i mašinskim sistemima minimizira trenje do granice mogućeg, postavljaju pred konstruktore potrebu da se u proces konstruisanja uključuju dovoljno i tribološki aspekti konstruisanja.

U godinama koje dolaze treba očekivati da će tribološki ispravno konstruisanje biti jedan od osnovnih zahteva koji se pri konstruisanju moraju ispoštovati.

LITERATURA

1. H. Kottritsch, M. Albert: Kontaktgeometrie und Leistungsvermögen der Walzlager, „Maschinenwelt-Elektrotechnik“, 1984, 39, N⁰ 5.

2. H. Peek: Die tribologisch richtige Konstruktion, „VID-Z“, 1976, 118, N 5.

3. J. Halling: A tribological approach to bearing design, „Des. Eng.“, 1976, 59, 61.

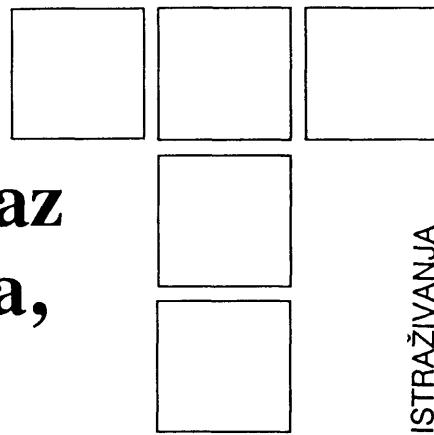
4. H. Čihos: Sistemni analiz v tribonike, „Mir“, Moskva, 1982.

5. D. Garkaunov: Tribotehnika, „Mašinostroenie“, Moskva, 1982.

6. V. Zorin: Osnovne dolgovečnosti strojnih i dorožnih mašin, „Mašinostroenie“, Moskva, 1986.

7. M. Lazić: Tribološki aspekti projektovanja i konstruisanja mašina alatki, „Tribologija u industriji“, 1986, 8, N⁰ 3.

8. M. Lazić: Tribološki aspekti projektovanja i konstruisanja mašina alatki, „Tribologija u industriji“, 1987, 9, N⁰ 1.



Strukturno-energetski prilaz proučavanju procesa trenja, habanja i podmazivanja u obradi metala rezanjem*

ISTRŽIVANJA

S ruskog preveo: Dr Miodrag Lazić

1. UVOD

U uslovima značajne primene automatskih obradnih sistema u metalopreradivačkoj industriji, zadatak povećanja optornosti na habanje reznih elemenata alata spada u red važnijih problema obrade metala rezanjem.

Rešenje tog problema zahteva kompleksno i sistematsko proučavanje prirode površinskog i zapreminskega razaranja površinskih slojeva reznog klini alata, primenom tačnih metoda fizičko-hemiske analize, postupaka koji će u komparaciji sa poznatim klasičnim postupcima i metodama dati potpuniju informaciju o prirodi trenja i habanja površinskih slojeva reznih elemenata alata.

2. USLOVI ISPITIVANJA

Ispitivanja mehanizma habanja reznih alata izradjenih od tvrdog metala ostvarena su u obradi struganjem. Materijal predmeta obrade je čelik 45 i 40X (po ГОСТ-u, a režim obrade je određen sledećim parametrima: brzina rezanja $V = 10-150$ m/min, dubina rezanja $\delta = 2$ mm i korak $S=0,3$ mm/o).

Kao rezni alat korišćene su izmenjive višesečne pločice izradjene od tvrdog metala kvaliteta TH-20, T15K6 i BK8 (ГОСТ 19052-80). Geometrija reznog dela je određen uglovima $\gamma = -10^0$, $\alpha = 10^0$, $\lambda = 0^0$ i $\kappa = \kappa_1 = 45^0$. Oštrenje pločica je ostvareno, primenom dijamantskog tocila, po grudnoj površini reznog klini. Ispitivanja mehanizma habanja izvedena su korišćenjem metod elektronske mikrofotografije /1/, mikroskopije tanke folije /2/, mikrorendgenske

spektralne analize, metoda unutrašnjeg trenja /3/ i metoda egzoelektronske emisije /4/.

3. REZULTATI ISPITIVANJA

Rezultati ispitivanja habanja reznih elemenata alata od tvrdog metala, pri niskim brzinama rezanja od 15-50 m/min, pokazuju da su osnovni mehanizmi habanja mikro-rezanje i odvajanje zrna karbidne faze (sl. 1,a). Pri brzinama rezanja, koje odgovaraju ekstremnim vrednostima funkcionalne zavisnosti parametra habanja brzine rezanja, dimenzije čestica odvojenih od kontaktnih slojeva alata se smanjuju (sl. 2). Kod visokih brzina rezanja u preseku se uočava veća grupa zrna karbida na grudnoj i ledjnoj površini reznog klini alata. To je razlog ubrzanog formiranja kratera i pojasa habanja na reznom klinu alata.

Elektronsko-mikroskopska ispitivanja, uz primenu tankih folija tvrdih legura, pokazuju da, istovremeno sa visokom strukturalnom nehomogenošću površinskih slojeva tvrdih legura (oscilovanje dimenzija zrna karbida i spregnutih meduslojeva), dolazi do različite gustine dislokacija zrna karbidne faze, nakon obrade dijamantskim tocilom. Kod nekih zrna dislokacija se ne uočava, a kod velikog broja zrna gustina dislokacija dostiže vrednost $\sim 10^7$ cm $^{-2}$ (sl.1,b). Pri obradi materijala sa nižim vrednostima brzine rezanja ($V = 15-50$ m/min), pod dejstvom tangencijalnih napona, u pojedinim zrnima karbidne fazе (WC, TiC) gustina dislokacija dostiže vrednost $\sim 10^{11}$ cm $^{-2}$. Raspodela dislokacija je neravnomeran, jer se skupljanje dislokacija javlja u blizini uključaka i na granicama zrna. To dovodi do razorijentacije zrna i pojave zrna podvrgnutih mikrorezanju kao mehanizmu habanja. Na površinama nekih zrna formiraju se polja klizanja, koja

* Rad objavljen u naučno-tehničkom časopisu "ТРЕНИЕ И ИЗНОС", tom 10, broj 9, 1989.

svedoče o gubitku čvrstoće na smicanje. Sve to izaziva pojavu mikropukotina između zrna sa jedne i defekata nastalih usled odvajanja kako pojedinih zrna tako i njihovih grupa (agregata) sa druge strane. Obradu manjim brzinama rezanja karakteriše, takodje, pojava intenzivnog prenosa materijala predmeta obrade na kontaktne površine reznog klilna alata i značajnija pojava naslage na reznom klinu alata. Primenom metode rendgenske mikroanalize (JXA-50A) ustanovljeno je da prenos materijala predmeta obrade na površinske slojeve reznog klina alata izradjenog od tvrdog metala nastaje na

elemenata iz spoljašnje sredine (kiseonika iz vazduha) u zonu rezanja.

Rezultati izvedenih ispitivanja imaju principijelan značaj za identifikovanje zavisnosti procesa habanja reznih elemenata alata izradjenih od tvrdog metala, u obradi metala rezanjem. To identifikovanje zavisnosti je posebno povezano sa nehomogenom deformacijom zrna u površinskim slojevima i strukturalnim promenama (evolucija dislokacione strukture) u zrnima karbidne faze, nastalih kao rezultat dejstva tangen-



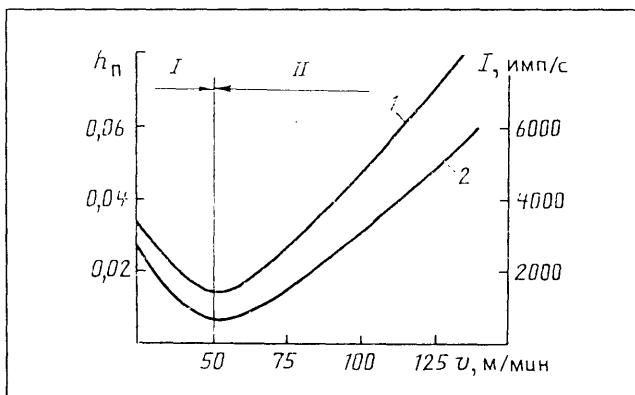
Slika 1.

Mikrofotografija tvrdog metala kvaliteta TH-20: a) razaranje površinskih slojeva-kontaktnih slojeva (razorijentacija, cepanje i odvajanje zrna karbida $\times 5000$), b) nagomilavanje dislokacija u ravni pri brzini rezanja 25 m/min ($\times 14000$), c) fragmentacija zrna titan-karbida pri brzini rezanja 50 m/min ($\times 24000$).

nekom rastojanju od glavne rezne ivice/1.

Ispitivanja su, takodje, pokazala da je obrazovanje naslage pri rezanju usko povezano sa pojavom maksimalnog modula deformisanja u površinskim slojevima strugotine neposredno uz glavnu reznu ivicu. To govori da su ovi slojevi podvrgnuti maksimalnim naprezanjima na smicanje i da ih karakteriše specifično, jako pobudjeno, stanje. Takvo stanje deformisanih slojeva pogoduje pojavi anormalnog otvrdnjavanja i porasta količine ukočenih slojeva, uz intenziviranje prodora

cijalnih naprezanja, zakretanjem zrna i formiranjem visoke koncentracije napona na granicama zrna u procesu spoljašnjeg trenja. Sniženje nivoa čvrstoće na smicanje pojedinih zrna karbida (WC, TiC), u uslovima visokih kontaktnih naprezanja (pritisak + smicanje), dovodi do akumuliranja energije elastičnog deformisanja i formiranja koncentracije napona, u momentu kada gustina dislokacija u zrnima karbida dostigne vrednost blisku kritičnoj ($\rho \approx 10^{12} \text{ cm}^{-2}$). U takvim uslovima javlja se pucanje zrna, što se eksperimentalno utvrđuje ispitivanjima ne elektronskom mikroskopu (sl. 1, a). Formiranje kliznih polja na površine zrna, usled masovnog izlaska dislokacija na površinu, dovodi do tvrdog faznog međudejstva zrna karbida i obradivog materijala, uz pojavu razdvajanja međuatomskih veza i elektronske razmene. Mikropukotine, obrazovane na granicama zrna (usled cikličnog dejstva obrtnih momenata i nesaglasnog zakretanja zrna ili grupe zrna-agregata u procesu spoljašnjeg trenja, olakšavaju athezioni raspad-raskid zrna sa površinskih slojeva tvrdog metala (sl. 1,a). Tako odvojene čestice i zrna abrazivno dejstvuju na niže-rasporedjena zrna /1/.



Slika 2.

Zavisnost habanja po grudnoj površini (h_p - krival) i intenziteta egzoemisije (I - kriva 2) u površinskim slojevima pločice od tvrdog metala i brzine rezanja ($S=0,3 \text{ mm/o}$ i $\delta = 2 \text{ mm}$): I - krto mikrorezanje (deformacija na smicanje) i II - krto-plastično razaranje (smicanje + medjuzrnasta deformacija). Materijal reznog dela alata tvrdi metal kvaliteta BK8, materijal predmeta obrade je čelik 45 (TOCT).

S porastom brzine rezanja ($V = 50-80 \text{ m/min}$) habanje reznih elemenata alata od tvrdog metala (sl. 2) se snižava. Pri optimalnim brzinama rezanja, zrna karbida (WC, TiC), a pri korišćenju tvrdih metala koji sadrže titan, zrna TiC se fragmentiraju (sl.1,c). Na radnim površinama alata izradjenih od tvrdog metala kvaliteta BK8 i T15K6 formira se, takodje, tekstura. Zona zakočenih slojeva (naslage) se smanjuje.

Vrednost intenziteta egzoemisije, pri optimalnim brzinama rezanja, se snižava (sl. 2), što svedoči o povećanju stabilnosti energetskog stanja površinskih slojeva reznog klina alata.

Elektronsko-mikroskopska ispitivanja tankih folija izrađenih od tvrdog metala kvaliteta TH-20 pokazuju da se pri, optimalnim brzinama rezanja, zapremina izdvojenih čestica, sa površinskih slojeva reznog klina alata, smanjuje. Produkti mikrorezanja (dispergovana) zrna mogu popunjavati prostor između zrna, a nakon otvrdnjavanja i sinterovanja dostižu visoku tvrdoću.

Elektronsko-grafička analiza kontaktnih površina reznog klina alata izradjenih od tvrdog metala kvaliteta BK8, T15K6 i TH-20, pri nižim brzinama rezanja, omogućuje identifikovanje oksida CoO, TiO, MoO₃, koji se uočavaju u vidu odvojenih „ostrva“. Pri optimalnim brzinama rezanja, kod kojih se intenzitet habanja snižava (sl. 2), uočavaju se oksidne faze WO₃, TiO₂ i TiO₃. Merenje mikrotvrdoće, u površinskim slojevima na uzdužnim šlifovima pločica od tvrdog metala kvaliteta BK8, pokazalo je da, pri optimalnim brzinama rezanja, dolazi do otvrdnjavanja kontaktnih slojeva alata. Deformacija je lokalizovana u veoma tankom podpovršinskom sloju pločice.

Na temperaturnoj zavisnosti unutrašnjeg trenja tvrdog metala kvaliteta BK8, pri temperaturi 1073 K, uočava se relaksacioni pik, nastao kao rezultat razvoja difuzionih procesa na granicama zrna.

4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Izvedeni kompleks ispitivanja pokazuje da je sniženje habanja alata, pri optimalnim brzinama rezanja, vezano sa tokom deformisanja površinskih slojeva alata na različitim strukturnim nivoima. Sniženje otpornosti zrna na smicanje, povećanje temperature kretanja i skupljanje dislokacija u zrnima karbida dovodi do fragmentacije zrna. To izaziva intenziviranje procesa plastičnog tečenja u površinskim slojevima, međusobnih dejstava sa spoljašnjom sredinom i pojave tekstura. Akumulacija energije deformisanja u površinskim slojevima je homogenija, jer u procesu deformisanja učestvuju granice fragmenata. Sposobnost dissipacije energije elastičnog deformisanja se povećava, usled pojave dopunskog rotacionog modula plastičnosti. Porast rezerve elastične energije u zrnima karbidne faze, relaksacija naprezanja na zidovima zrna i intenzivno otvrdnjavanje površinskih slojeva, a takodje i povećanje stabilnosti proces rezanja, uslovjava smanjenje intenziteta habanja, pri optimalnim brzinama rezanja.

Porast habanja reznih elemenata alata, pri većim brzinama rezanja (sl. 2), je rezultat intenziviranja difuzionih procesa na granicama razdvajanja karbida i vezivnog materijala odnosno u samom vezivnom matalerijalu, a takodje i graničnog karaktera plastičnog tečenja strukturalnih elemenata u podpovršinskom sloju strugotine.

Na grudnoj površini reznog klina alata uočava se ukočeni sloj materijala predmeta obrade, čvrsto vezan sa površinskim slojevima alatnog materijala, zatim odvajanje (izdvajanje) vezivnog materijala i njegova supstitucija sa materijalom predmeta obrade. Karbidna zrna, kao abrazivni materijal, pri vrtložnom kretanju izazivaju razarenje površinskih slojeva kratera. Na površini strugotine, koja je okrenuta ka grudnoj

površini reznog klina alata, uočavaju se kugličasti oblici čestica. Sve to govori o vrtložnom karakteru plastičnog tečenja strukturalnih elemenata materijala predmeta obrade u podpovršinskim slojevima strugotine /8/.

Razarenje reznih elemenata alata razdvajanjem je rezultat razvoja difuzionih procesa (mikro-puzanje) u vezivnom materijalu na granicama zrna. To dovodi do proklizavanja zrna i olakšanog zakretanja zrna pri deformisanju. Metodama analize unutrašnjeg trenja utvrđeno je da se temperatura početka formiranja pika granice zrna poklapa sa temperaturom pri kojoj nastaje oštar porast vrednosti parametra habanja. Rastresanje medjuzrnastih i medjufaznih granica, obrazovanje mikropukotina i mikrošupljina i njihovo slivanje u magistralnu pukotinu dovodi do medjuzrnastog viskoznog (plastičnog) razaranja kontaktnih površina skidanjem, bilo rezanjem bilo smicanjem većih količina alatnog materijala /1/.

Povećanje intenziteta habanja reznih alata izradjenih od tvrdih metala, pri visokim brzinama rezanja, je rezultat vrtložnog mehanizma odvajanja zrna karbidne faze.

Uticaj athezionih pojava na habanje reznih elemenata alata je direktno povezan, pri većim brzinama rezanja, sa turbulentnim karakterom tečenja strukturalnih elemenata u okolini glavne rezne ivice. To je rezultat porasta specifičnih kontaktnih napona i stepena deformacije podpovršinskih slojeva strugotine.

Na taj način, proces spoljašnjeg trenja, u obradi metala rezanjem, prati akumulirana energija elastičnog deformisanja površinskih slojeva. Ona je posledica povećanja gustine dislokacija u zrnima karbida. Sve to ukazuje da se zakonomernosti habanja reznih elemenata alata od tvrdog metala mogu pratiti i sa energetskog aspekta /5/.

Sa termodinamičkog aspekta sistem trenja u obradi metala rezanjem se svrstava u grupu otvorenih disipativnih sistema. Proces dissipacije je rezultat spoljašnjeg trenja, a rad sile trenja A_T utrošen na promenu unutrašnje energije ΔU u površinskim slojevima i generiranje odgovarajuće količine toplote Q iznosi

$$A_T = \Delta U + Q. \quad (1)$$

Saglasno izvedenim ispitivanjima tvrdoća površinskih slojeva, u uslovima produženih cikličnih elastično-plastičnih deformacija, će biti dostignuta pri:

$$\frac{dA_T}{dt} - \frac{dU}{dt} - \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (2)$$

gde je t - vreme rezenja.

Jednačina (2) pokazuje da energija, sadržana u površinskim slojevima, treba da bude akumulirana ili dispergovana. Razaranje površinskih slojeva nastaje samo onda kada specifična zapremina materijala apsorbuje energiju granične vrednosti stvorenu spoljašnjim trenjem.

Granično stanje nastaje pri zagrevanju do graničnih temperatura ili pri određenom stepenu plastičnog deformisanja ili pri njihovom zajedničkom dejstvu. To znači da je energija graničnog stanja

$$E_{gr}^U = E_T^U + E_d^U \quad (3)$$

gde su E_T^U - topotna energija i E_d^U - energija deformisanja.

Oštećenje alatnog materijala pri manjim i srednjim vrednostima brzine rezanja je povezano sa rezervom energije deformisanja E_d^U u zrnima karbidne faze. Rezerva energije, u lokalnim zapreminama deformisanog tvrdog tela, proporcionalna je, u prvom približenju, specifičnoj energiji deformisanja na jedinicu dislokacije E_0 i povećanju gustine dislokacije ρ , odnosno :

$$E_d^U = E_0 \rho \quad (4)$$

Energija deformisanja, nakon obrade dijamantskim tocilom, je nejednako rasporedjena u lokalnim zapreminama površinskih slojeva rezogn kline alata izradjenog od tvrdog metala. U procesu spoljašnjeg trenja, u toku obrade rezanjem, nehomogenost energetskog stanja površinskih slojeva raste. Proces rezervisanja energije deformisanja u površinskim slojevima je kinetičkog karaktera. Zrna karbidne faze u sinterovanom tvrdom metalu, kako je to već identifikovano, nakon oštrenja imaju već određeni stepen gustine dilokacija, tj. određenu rezervu energije. U procesu spoljašnjeg trenja gustina dislokacija se povećava.

Deformacija površinskih slojeva se, u uslovima spoljašnjeg trenja karakterističnog za obradu metala rezanjem, lokalizuje u mikro-zapreminama kristalnih rešetaka pojedinih zrna karbida (sl. 1,b). To znači da je otpornost na habanje reznih elemenata izradjenih od tvrdog metala proporcionalan energiji elastičnog deformisanja, potreboj za mikrorazaranje zrna karbidne faze, posebno u uslovima kada je akumulirana kritična dinamička gustina dislokacija ρ , u lokalnoj zapremini kristalne rešetke, značajna.

Nehomogenost strukture tvrdog metala, oscilovanje dimenzija zrna karbidne faze i različito energetsko stanje zrna

Granična rezerva energije, u subgranicama zrna karbidne faze WC, TiC itd, saglasno struktурно-energetskoj teoriji čvrstoće tvrdih tela /6/, određena je jednačinom:

$$E_d^U = E_0 \rho_{kr} = \int_{T_i}^{T_p} C_p dt \quad (5)$$

gde su: T_p - temperatura topljenja, T_i - temperatura ispitivanja, C_p - specifični topotni kapacitet i T - postojanost alata.

U tablici 1 prikazane su vrednosti graničnog energetskog kapaciteta energije teško obradljivih jedinjenja (legura), koji čine osnovne komponente tvrdih metala, kao i oksidne faze uočene pri elektronsko-grafičkoj analizi površina habanja. Visoka vrednost energetskog kapaciteta karbidnih i oksidnih faza (TiO₂, Ti O i sl.) objašnjava se povećanjem otpornosti na habanje tvrdih metala tipa BBTC (GOCT) u poređenju sa tvrdim metalima tipa BK8.

Fragmentacija zrna karbidne faze propraćena je nestankom obrazovanih dislokacija na sub-granicama zrna i smanjenjem unutrašnje energije, što obezbeđuje rezervisanje energije na površinskim slojevima, u procesu dalje obrade. Razdvajanje kristalnih zrna na delove-fragmente obezbeđuje homogenizaciju deformacije zrna i rezervisanje energije deformisanja u lokalnim zapreminama.

Ocena otpornosti na smicanje τ_s karbidnih zrna, pri različitoj gustini dislokacija (saglasno proučavanjima niza autora /12/), obezbeđena je relacijom

$$\tau_s = \alpha G b \rho^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

u kojoj se α - koeficijent proporcionalnosti, G - modul smicanja i b - vektor Burger-sa.

Proračuni su pokazali da je, pri gustini dislokacija $\rho = 10^7$ cm⁻², otpornost na smicanje $\tau_s = 66,25$ MPa, a pri kritičnoj gustini dislokacija $\rho = 5 \cdot 10^{12} - 10^4$ cm⁻² $\tau_s = 2187$ MPa, što je znatno iznad vrednosti tangencijalnih napona ($\tau_f = 800 - 600$ MPa), koji se javljaju pri brzinama rezanja $v = 20 - 80$ m/min. Prema tome, elastično-plastičnoj deformaciji i razaranju, pri spoljašnjem trenju, podvrgnuta je zapremina zrna karbida rasporedjena unutar fragmenata. To se

Jedinjenja	Energetski kapacitet (kJ/mol)		Jedinjenja	Energetski kapacitet (kJ/mol)	
	E _{773 K}	E _{1273 K}		E _{773 K}	E _{1273 K}
WC	122,8	106,9	TiO ₂	102,9	65,6
TiC	154,9	129,2	MoO ₃	31,2	-
TiO ₂	82,2	52,1	Ti ₂ O ₃	246,6	173,3
CoO	79,4	50,8	WO ₃	115,3	54,2

Tablica 1.
Granični energetski kapacitet teško obradljivih jedinjenja

karbida (različita gustina dislokacija) dovode do neravnomerne akumulacije energije deformisanja u lokalnim zapreminama površinskih slojeva, posebno u procesu spoljašnjeg trenja, i do povećanja intenziteta mikro-razaranja zrna karbidne faze.

objašnjava smanjenjem zapremine odvojenih čestica sa površinskih slojeva materijala alata pri ekstremnim brzinama rezanja, čestica koje zalaže u medjuprostore zrna. Niska otpornost na smicanje karbidnih zrna, pri gustini dislokacija koja iznosi $\rho = 10^6 - 10^{10}$ cm⁻², kako je to već zapaženo,

dovodi do obrazovanja aktivnih centara i razvoja procesa tvrdo-faznog medjudejstva abrazivnog i alatnog materijala.

Fragmentaciju zrna karbidne faze i obrazovanje energetsko-kapacitivnih oksida, pri optimalnim brzinama rezanja, treba razmatrati u konstelaciji sa zakonitostima samo-organizacije termidonamičkih neravotežnih dinamičkih pobudnih sistema i obrazovanja ravnotežnog stanja disipativnih struktura u toku kretanja /7-10/. Pokretnu silu formiranja disipativnih struktura, u površinskim slojevima materijala alata, predstavlja težnja sistema trenja ka samoregulisanju sa smanjenom pojmom entropije i povećanom brzinom disipacije energije, rezervisanom u sistemu. Rezervisanje se javlja oko tačke račvanja (konkretno definisane tačke), usled pojave novih stepena slobode-novih kanala disipacije energije.

Ako je, pri nižim vrednostima brzine rezanja, osnovni mehanizam disipacije akumulirane energije, u površinskim slojevima, mikro-skidanje zrna karbida (sl. 1,a) i obrazovanje medjuzrnastih mikropukotina, tada je, pri optimalnim brzinama rezanja V_{opt} , proces smoorganizovanja u sistemu trenja, sniženje proizvodnje entropije i disipacija akumulirane energije redosledno povezanim medjudejstvima dislokacija u zrnima karbida. Pri tome se proces samoorganizovanja sistema trenja manifestuje pojmom naslage. Sve to dovodi do fragmentacije zrna i pojave rotacionog modula plastičnosti /11/, čiji je nosilac delimična dislokacija u kristalima. Sitnjenje zrna karbidne faze tvrdih metala, a takodje i obrazovanje oksida titana TiO_2O_3 , WO_3 i sl. povećava disipativna svojstva površinskih slojeva alata.

Formiranje trakaste strugotine, sa porastom brzine rezanja, treba razmatrati kao rezultat samoorganizovanja u sistemu trenja što, pri optimalnim brzinama rezanja, dovodi do povećanja stabilnosti procesa rezanja.

Na taj način, pri optimalnim brzinama rezanja, javlja se složeniji tip samoorganizovanja, usavršen na različitim strukturnim nivoima u strugotini i površinskim slojevima alata.

Metodama unutrašnjeg trenja, eksperimentalno, je utvrđeno da formiranje fragmentiranih struktura u površinskim slojevima dovodi do povećanja amortizacionih osobina tvrdih metala.

Disipativne osobine i energetski kapacitet raste, takodje, i pri formiranju slabo dispergovanih struktura u površinskim slojevima tvrdih metala, kao rezultat dispergovanja zrna karbidne faze. Pri laserskom dodavanju energije u površinske slojeve, utvrđen je porast energetsko-kapacitivnih i disipativnih osobina tvrdih metala sitno-zrnaste i homogene strukture. To znači da, obrazovanje slabo dispergovanih struktura, u površinskim slojevima tvrdih metala, u procesu spoljašnjeg trenja, predstavlja jedan od mehanizama samoorganizovanja površinskih slojeva i obrazovanja disipativnih struktura u sistemu trenja.

5. ZAKLJUČCI

Analiza zakonomernosti habanja i plastičnog razaranja tvrdih metala pokazuje da je nemonotonost zavisnosti parametra habanja:

$$U = f(V) \text{ i}$$

postojanosti alata:

$$T = f(V),$$

uslovljena mehanizmom deformisanja karbida i disipacije akumulirane energije u sistemu trenja (zona obrazovanja strugotine, podpovršinski slojevi strugotine i površinski slojevi alata), a takodje i oblicima disipativnih struktura i njihovom postojanošću sa porastom brzine rezanja.

Ispitivanja su dovela i do zaključka da formirana strukturalna stanja u površinskim slojevima alata, pri ekstremnim brzinama rezanja, zadržavaju odgovarajuće osobine u dužem vremenskom periodu, tj. imaju odgovarajuću kinematsku stabilnost. To je, u najvećem stepenu, uslovljeno sposobnošću atoma (jona) spoljašnje sredine (kiseonika, azota iz vazduha i sl.) da obezbede stabilizaciju fragmentirovane strukture, povećanje njihove postojanosti i termičke stabilnosti.

Identifikovano svojstvo fragmentiranih struktura zadržava se u veoma dugom vremenskom periodu (stanje povećane čvrstoće) i dobro se slaže sa fundamentalnim postavkama fizike razvoja plastičnog deformisanja /11/. Bilo koja struktura u uslovima nastavka procesa plastičnog deformisanja je nepostojana, osim fragmentirane.

Stabilnost disipativnih struktura, formiranih u zrnima karbidne faze pri nižim brzinama rezanja (polovi klizanja, naslaga), je niska, što dovodi do intenziviranja procesa habanja. Stabilnost naslage kao disipativne strukture, saglasno izvedenim ispitivanjima, je niska u određenim temperaturno-brzinskim uslovima. Odvajanje naslage prati i odvajanje većih zapremina alatnog materijala.

Identifikovanje zakonomernosti habanja alata od tvrdih metala, u obradi metala rezanjem, omogućuje formulisanje pojma „optimalnog strukturalnog stanja površinskih slojeva alata“. Optimalno strukturalno stanje površinskih slojeva predstavlja takvu energetski stabilnu strukturu površinskih slojeva i oksidnih faza, koje obezbeđuju visoku otpornost alatnog materijala na mehanička i toplotna naprezanja.

6. LITERATURA

1. КАБАЛДИН Ю. Г., Станки и инструмент, 1982, Но. 2, с. 23-25
2. ПИЛЯНКЕВИЧА. И., БРИТУНВ. Ф., Порошковая металлургия, 1981, Но. 11, с. 97-101
3. КАБАЛДИН Ю. Г., БУРКОВ А. А., КОЖЕВНИКОВ Н. Е., ИЗТОВ С. А., Машиностроитель, 1986, Но. 7, с. 23