

**UTICAJ KVALITETA OBRADENE POVRŠINE NA PRITISAK U  
SLOJU MAZIVA U TRIBOLOŠKIM KONTAKTIMA**

**INFLUENCE OF THE QUALITY SURFACE TREATMENT ON THE  
PRESSURE IN THE OIL LAYER IN TRIBOLOGIC CONTACTS**

**Mr Sulejman Sokolović, viši asistent  
Mašinski fakultet Mostar**

**Prof. Dr. Safet Brdarević  
Mašinski fakultet Zenica**

**Ključne riječi:** tribologija, hrapavost površine, viskozitet ulja, brzina, pritisak u sloju ulja, nestišljivost, koeficijent trenja klizanja

**REZIME**

*U ovom radu data su razmatranja uticaja sloja ulja u prostoru neravnina između alata i materijala obratka. Izračunate su teoretske vrijednosti pritiska u sloju maziva u zavisnosti od hrapavosti kontaktnih površina, viskoziteta upotrebljenog ulja u procesu i relativne brzine alata i materijala obratka i upoređene sa stvarnim vrijednostima procesnog pritiska materijala obratka na alat. Uveden je i pojam nestišljivosti ulja i njegov uticaj na koeficijent trenja klizanja.*

**Key words:** tribology, surface topography, oil viscosity, speed, pressure in oil layer, oil nocompression, friction coefficient

**SUMMARY**

*In this paper anticipations of the oil layer influences in rough area between tool and material are presented. Here are theoretical formulas which are helpful to predict the pressure in oil layer in dependence of surface topography, used oil viscosity and relative speed of tool and material, and compared with real material's pressure value on tool. Here is and notion "oil nocompression" and influence on friction coefficient*

**1. UVOD**

Iz osnova nauke o Tribologiji poznati su različiti uslovi podmazivanja i uslovi koji su važeći na mjestima podmazivanja. U procesu hladnog deformisanja, ulje kao sredstvo za podmazivanje i hlađenje, uvodi se namakanjem materijala obratka prije ulaska u proces (nakon mehaničke i hemiske pripreme materijala). Tako uvedeno mazivo zadržava se u porama hrapavosti površina između materijala i alata stvarajući mjestimično veoma različite uslove podmazivanja. Naime na nekim mjestima, posmatrano sa aspekta hrapavih površina, materijal obratka i alat su u direktnom kontaktu, a na nekim mjestima između materijala obratka i alata nalazi se "lokвица" ulja čije dimenzije odgovaraju dimenzijama hrapavosti na

posmatranom mjestu. Općenito, kontaktno područje alata i materijala obratka može se shvatiti kao "tigrova koža" u kojoj "crna" ili "bijela" polja čine mjesta sa uljem.

U praksi se obično operiše sa tkz. pokazateljem vida podmazivanja  $\lambda = \frac{h}{R_{a1} + R_{a2}}$

gdje je :

- h debljina sloja maziva
- $R_{a1}$  i  $R_{a2}$  srednja aritmetička odstupanja profila kontaktne površine alata odnosno materijala obratka

U našem slučaju, kada ulje u proces ulazi namakanjem materijala obratka, radi se o slučaju graničnog podmazivanja, (prema [1], [2]), pa je :

$$\lambda \leq 1, \dots\dots\dots(1)$$

tj. površine alata i materijala obratka su u direktnom dodiru ili su u najboljem slučaju djelomično razdvojene što zavisi od :

- pritiska u sloju maziva
- kvaliteta maziva
- hrapavosti kontaktnih površina
- brzine relativnog kretanja kontaktnih površina

Pritisak p u sloju maziva je veoma koristan sa aspekta poboljšanja uslova podmazivanja. Na mnogim mjestima na kontaktnoj površini ulje se nalazi trenutno zatvoreno između neravnina alata i materijala obratka i ponaša se kao uljni nestišljivi jastuk i dovodi do smanjenja površine direktnog kontakta alata i materijala obratka i kao hipoteza treba da stoji slijedeće:

- ulje na sebe preuzima dio bočnog procesnog pritiska između alata i materijala obratka
- dolazi do smanjenja koeficienta trenja klizanja

Na Slici 1. pokazana je opšta Stribeck-ova kriva vida podmazivanja sa koefijcientom trenja klizanja  $\mu$  na ordinati i odnosom  $\eta \cdot n / p$  na apscisi gdje je:

- $\eta$  dinamički viskozitet
- n učestalost obrtanja
- p pritisak u sloju maziva

Iz te slike vidljivo je da se naš proces nalazi unutar označenog područja sa Slike 1.

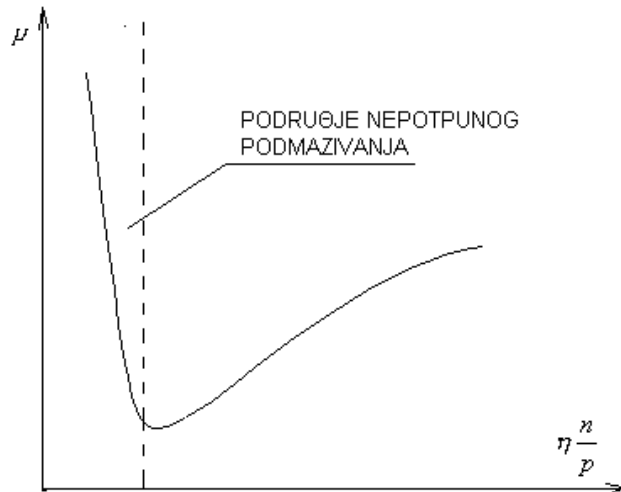
Neravnine kontaktne površine alata i materijala obratka se zbog neprekidnog unošenje ulja putem materijala obratka stalno pune uljem. Imamo situaciju da su pri procesu, tj. pri kretanju materijala obratka po alatu, površine alata i materijala obratka mjestimično u direktnom dodiru i mjestimično razdvojene slojem ulja.

Na mjestima dodira odvija se proces habanja, a na "uljnim mjestima" (mjestima razdvojenosti alata i materijala obratka) javlja se hidrodinamički pritisak koji nastoji izvršiti razdvajanje alata i materijala obratka.

## 2. TEORETSKA RAZMATRANJA

Hidrodinamički pritisak u sloju maziva prema Reynolds-u je funkcija :

- debljine sloja maziva h
- relativne brzine kretanja alata i materijala V
- dinamičkog viskoziteta ulja  $\eta$



SLIKA 1: OPŠTA STRIBECK-OVA KRIVA VIDA PODMAZIVANJA

Ako se usvoji da je :

- materijal alata i materijal obratka krut
- viskozitet ulja konstantan (vrijeme zadržavanja ulja u našem procesu je jako kratko i doprinosi hipotezi o konstantnosti viskoziteta ulja)
- kreće se samo kontaktna površina materijala obratka brzinom V

Pod tim okolnostima Reynolds-ova jednačina ima oblik : (prema [1], [2]),

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \cdot \eta \cdot V \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad \dots\dots\dots(2)$$

gdje su x i z koordinatne ose prema prikazu na Slici 2.

Rješenje te jednačine analiziraće se prema teoriji "kratkog ležaja" koja aproksimativno odgovara posmatrnom procesu (zbog jako kratkog radnog dijela kontakta alata i materijala obratka kod posmatrane matrice reduciranja)

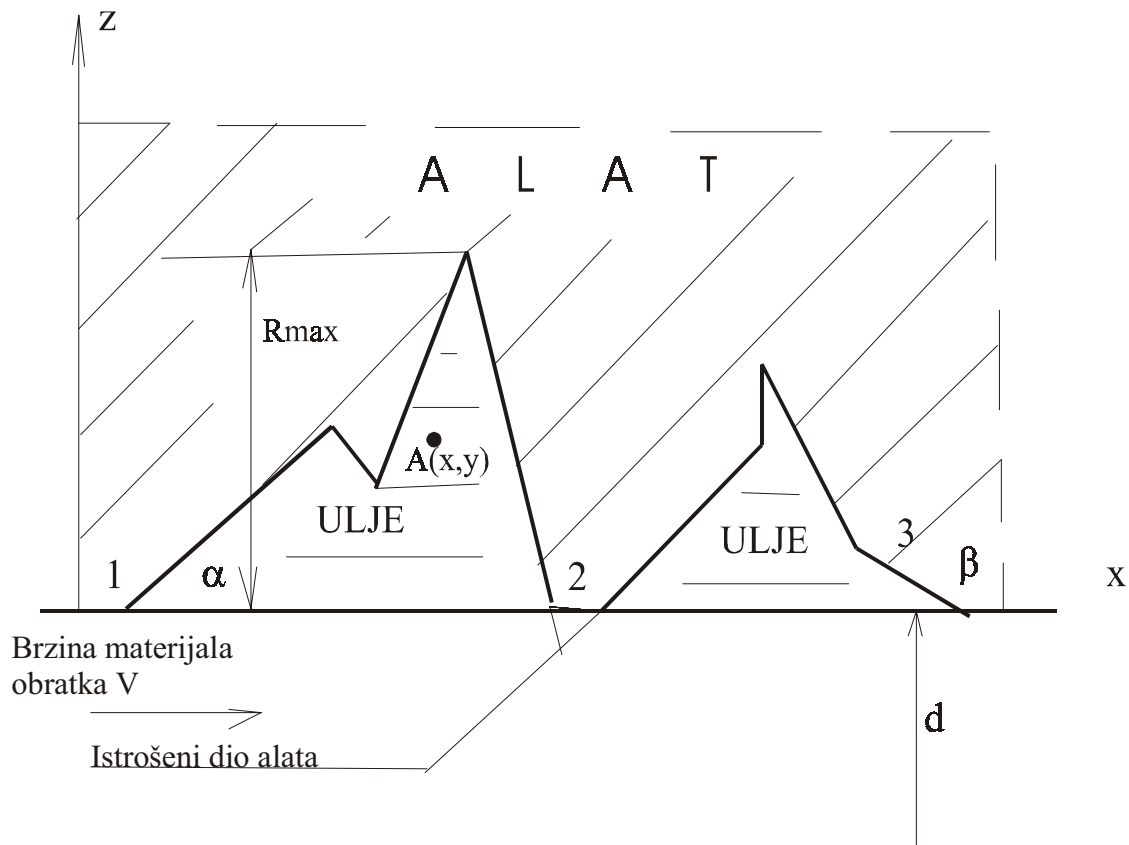
Po toj teoriji gradijent pritiska u x- pravcu mnogo je manji od gradijenta pritiska u z -pravcu ,tj.:

$$\frac{\partial p}{\partial x} \ll \frac{\partial p}{\partial z} \text{ pa se } \frac{\partial p}{\partial x} \text{ može zanemariti, pa je:}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \eta \cdot V \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad \dots\dots\dots(3)$$

Iz jednačine (3) se vidi da debljina maziva h zavisi samo od x. Ako se ta činjenica sagleda kroz situaciju na kontaktnoj površini onda se može reći da se debljina sloja ulja h u našem procesu mijenja po zakonu promjene hrapavosti kontaktne površine alata (hrapavost kontaktne površine materijala obratka, kao mnogo mekšeg materijala , u ovom radu se zanemaruje), pa je :

$$\frac{d}{dz} \left( h^3 \cdot \frac{dp}{dz} \right) = 6 \eta \cdot V \cdot \frac{dh}{dx} \quad \text{ili} \quad h^3 \cdot \frac{d^2 p}{dz^2} = 6 \cdot v \cdot \rho \cdot V \cdot \frac{dh}{dx} \quad \dots\dots\dots(4)$$



SLIKA 2.: PRESJEK KROZ ALAT

U izrazu (4) korišten je odnos dinamičkog  $\eta$  [ $N \cdot s / m^2$ ] i kinematskog  $\nu$  [ $m^2 / s$ ] viskoziteta u obliku :  $\eta = \rho \cdot \nu$  gdje je  $\rho$  [ $kg / m^3$ ] gustoća ulja

Nakon integracije dobija se :

$$\frac{dp}{dz} = 6 \cdot \rho \cdot \nu \cdot V \cdot \frac{dx}{h^3} \cdot z + C_1 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ili 
$$p = 3 \cdot \rho \cdot \nu \cdot V \cdot \frac{dx}{h^3} z^2 + C_1 z + C_2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

Pošto se ulje nalazi u veoma malom prostoru može se sa dovoljnom tačnošću kazati da nema promjene pritiska po z-osi,tj. za svako z pa i za z=0  $dp/dz=0$  ,pa je  $C_1=0$ .

Na svim mjestima direktnog kontakta alata i materijala obratka pritisak u ulju je p =0 Broj takvih mjesta zavisi od rasporeda neravnina alata i za svako to mjesto je p=0, pa je  $C_2=0$

(Pri ovim razmatranjima pretpostavljamo da je površina materijala obratka glatka iz osnovna dva razloga :

- hrapavost kontaktne površine materijala obratka nije od bitnog značaja obzirom da mu je tvrdoća mnogo manja od tvrdoće kontaktne površine alata
- sloj fosfatne prevlake u fazi pripreme materijala obratka popunjava neravnine na površini materijala obratka)

pa je konačno :

$$p = 3 \cdot \rho \cdot \nu \cdot V \cdot \frac{dx}{h^3} z^2 \quad \dots\dots\dots(7)$$

Promjena visine sloja maziva po x-osi  $dh/dx$  je u skladu sa promjenom visine neravnina alata uzduž njegove radne površine i predstavlja neimenovan broj.

Ako je zakon promjene neravnina (hrapavosti) dat u obliku :  $h = h(x)$  onda je izraz  $dh/dx$  iz

obrasca (7) izvod funkcije  $h = h(x)$  odnosno :  $\frac{dh}{dx} = h'$

Ako napravimo presjek kroz alat i materijal imamo Sliku 2. kako slijedi:

- Mjesto 1 na Slici 2. :  $dh/dx = \text{tg } a$   
 Mjesto 2.  $dh/dx = 0$   
 Mjesto 3.  $dh/dx = \text{tg } b$  itd.

Pošto je u obrascu (7) pritisak u sloju ulja  $p$  direktno zavisen od veličine  $dh/dx$  varijacije pritiska u sloju maziva biće u skladu sa veličinom tangensa ugla nagiba ( $h'$ ) neravnina alata. Debljina sloja maziva ( $h$ ) u našem slučaju može se aproksimativno uzeti jednaka srednjoj aritmetičkoj vrijednosti odstupanja  $R_a$  svih tačaka profila površine kontaktne površine alata od srednje linije,tj.,

$$h \approx R_a = \frac{1}{m} \sum_1^m Y_z \dots\dots\dots(8)$$

- gdje je :
- $m$  broj mjerenja
- $Y_z$  trenutna vrijednost visine neravnine

Obrazac (7) tada postaje :

$$p = 3\rho \cdot v \cdot V \cdot \frac{h'}{R_a^3} \cdot z^2 \dots\dots\dots(9)$$

$R_a = \text{const.}$  za određeni profil

(Mikrogeometrija kontaktne površine alata je promjenjiva u toku procesa zbog pojava trenja i habanja. To dovodi do promjena karakteristika hrapavosti, pa se prethodna konstatacija  $R_a = \text{const}$  odnosi na relativno kratki vremenski period u odvijanju procesa)

Koordinata  $z$  mijenja se u dijapazonu 0 do maksimalne vrijednosti visine neravnina. Njena srednja aproksimativna vrijednost je  $z_{sr} = R_a$ , pa je srednja vrijednost pritiska u sloju maziva :

$$p_{sr} = 3\rho \cdot v \cdot V \cdot \frac{h'}{R_a} \dots\dots\dots(10)$$

Iz obrasca (10) se vidi da se na željeno povećanje pritiska u sloju maziva može uticati:

- izborom ulja sa velikim viskozitetom
- povećanjem brzine kretanja materijala obratka po alatu (što je u skladu sa željom za povećanjem produktivnosti rada)
- smanjenjem  $R_a$  odnosno povećanjem kvaliteta kontaktne površine alata

Iz obrasca (10) se na posredan način može zaključiti da povećanjem pritiska  $p$  u sloju maziva u procesu dolazi do mnogih pozitivnih efekata kao što su :

- smanjenje koeficijenta trenja klizanja
- povećanje moći nošenja alata što je u direktnom odnosu sa njegovom postojanošću

Analizirajući snimak hrapavosti radne površine matrice reduciranja prema [6] ,dobija se Tabela 1.

TABELA 1.: PRITISAK U SLOJU MAZIVA

Posmatrano mjesto alata prema [6]	Ugao nagiba neravnine /o/ prema [6]	$h'$	$z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$p$ [MPa]	$p_{sr}$ [MPa]
1	105	-3,75	0,015	-15,18	
2	115	-2,15	0,015	-8,7	
3	114	-2,25	0,015	-9,11	
4	120	-1,74	0,015	-7,04	
5	115	-2,15	0,015	-8,7	
					-9,746

Mjesta 1,2,3,,4,5 odabrana su na pomenutom snimku konfiguracije kontaktne površine alata(matrica reduciranja) i izvršeno je približno mjerenje ugla nagiba neravnina na slučajno odabranim mjestima 1,2,3,,4,5.

U Tabeli 1 korišteni su slijedeći podaci :

- Ulje : Polar 70 ISO WG100 (prema [5])
- Gustoća :  $\rho = 900 \text{ /kg/m}^3 /$
- Kinematski viskozitet:  $\nu = 90 \cdot [\text{mm}^2 / \text{s}]$  na  $40^\circ \text{C}$
- $R_a = 0,015 \text{ } [\mu\text{m}]$
- Brzina materijala po alatu  $V = 0,25 \text{ /m/s/}$  za broj udaraca prese  $n = 70 \text{ /o/min/}$  kod prese tip GB-2
- Vrijednost tabelarnog pritiska  $p$  u sloju maziva izračunata je po obrascu (10)

Prethodna tabela (Tabela 1.) daje samo trenutno stanje u procesu koji je sa tribološkog stanovišta neprekidno u promjeni zbog :

- promjena karakteristika hrapavosti u toku procesa ( $R_a ; h'$  )
- promjena veličine realne kontaktne površine
- promjena radne temperature
- promjena viskoziteta ulja
- promjena koeficijenta trenja klizanja

Nabrojane promjene su u uzajamnoj uzročno-posljedičnoj vezi u skladu sa redoslijedom nabrojanja.

### 3. ZAKLJUČAK

Ako se posmatraju izračunate vrijednosti pritiska u sloju ulja u prethodnoj tabeli možemo zaključiti slijedeće :

- Veličina pritiska u sloju ulja koja nastoji razdvojiti kontaktne površine alata i prerađivanog materijala po svojoj apsolutnoj vrijednosti ( približno 10 MPa) je zanemarljivo mala u odnosu na veličinu bočnog pritiska materijala obratka na alat  $N$ , tj.:  $p \ll N$
- Međutim, pritisak u sloju ulja (kontrapritisak) izračunat je iz hidrodinamičkih uslova tečenja ulja gdje nije uzeta u obzir vrlo bitna osobina ulja -njegova nestišljivost. Prilikom procesa, materijal obratka zaista djeluje na alat pomenutom vrijednošću bočnog pritiska  $N$ , ali na mnogim mjestima ne dolazi do direktnog kontakta alata i materijala, jer se tome suprotstavljaju mjesta između alata i materijala obratka u kojima se nalazi ulje gdje je pritisak u ulju po veličini jednak procesnom pritisku (granično podmazivanje). I pored pojave visokog bočnog pritiska  $N$  materijal obratka je na mnogim mjestima odvojen od alata i nemaju

direktan kontakt..Jedino time se može objasniti drastično smanjenje eksperimentalnih vrijednosti koeficijenta trenja klizanja u uslovima podmazivanja u odnosu na vrijednost koeficijenta trenja pri suhom kontaktu.Svakako da i prethodno nanese sloj fosfata kao mazivnog sredstva doprinosi umanjenju lokalnih pritisaka alata i materijala i smanjenju koeficijenta trenja klizanja.

- Izvlačeći prethodne zaključke neminovno se dolazi do značajnih pitanja u ovoj oblasti,a to su:

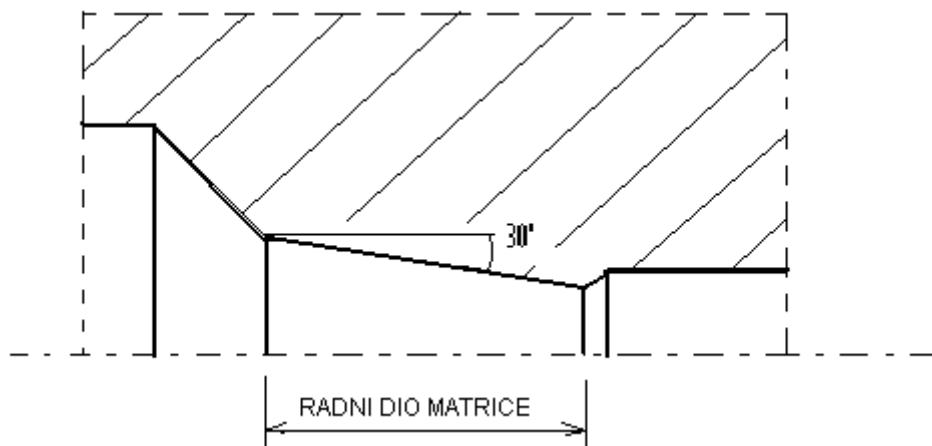
Šta se događa ako su kontaktne površine alata i materijala idealno glatke? Da li pojava hrapavosti kontaktnih površina ima pozitivan uticaj na uslove podmazivanja pod kojima radi alat?

Može se ipak konstatovati da male vrijednosti hrapavosti služe kao mikro rezervoari ulja i kako je već objašnjeno imaju pozitivnu ulogu u odvajanju kontaktnih površina alata i materijala obratka.

U teoretskom slučaju idealno glatkih kontaktnih površina u uslovima velikih bočnih pritisaka na alat, radni dio matrice reduciranja trebao bi biti izrađen konusno sa malim uglom od ulaza ka izlazu sa ciljem stvaranja "uljnog klina" samom konstrukcijom alata.Takvo rješenje sa konvergentnim površinama alata i materijala obratka bilo bi jako korisno i u uslovima realnih površina..

Skica radnog dijela takvog alata(nastala na osnovu dosadašnjih izlaganja i na bazi iskustva u obradi hladnim deformisanjem) data je na Slici 3..Na toj skici nije pokazano ,ali je jasno da svi prelazi sa jednog prečnika na drugi moraju biti kvalitetno zaobljeni zbog izbjegavanja razloga za pojavu koncentracije naprezanja

U teoretskom slučaju kada ne postoji hrapavost i kada je radna površina alata izvedena kao na Slici 3.vrijednost pritiska u sloju maziva bila bi  $p= 0,049$  MPa (Prema obrascu (10) i podacima uz Tabelu 1. što je vrlo mala vrijednost,ali bi efekti nestišljivosti ulja biti mnogo značajniji nego u slučaju hrapavih površina i teoretski ne bi bilo uopšte direktnog kontakta alata i materijala.



SLIKA 3. KONVERGENTNA IZVEDBA RADNOG DIJELA MATRICE REDUCIRANJA

I iz toga se zaključuje da je potreba za površinama kontakta sa što je moguće manjim neravninama imperativ.

#### 4.REFERENCE

- [1] B.Ivković;A. Rac: Tribologija , Kragujevac 1995.
- [2]S.Ekinović : Osnovi Tribologije i sistema podmazivanja,Zenica 2000.,
- [3]A. Rac :Osnovi Tribologije, Beograd 1991
- [4]"Olma" production programme of lubricants
- [5] INA maziva
- [6] Laboratorijski nalaz: Mašinski fakultet Sarajevo-Mjerenje hrapavosti