tribology in industry
tribologija u industriji

YUISSN 0351-1642
VOLUME 18
DECEMBER 1996.
4

YU ISSN 0351 - 1642

VOLUME 18
No. 4 (S)
DECEMBAR 1996.

tribologija u industriji

tribology in industry ◊ трибология в промышленности

sadržaj contents содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ВВЕДЕНИЕ

B. IVKOVIĆ: 10. međunarodna konferencija "Industrijski sistemi - IS'96" ◊ 10. International Conference on Industrial Systems - IS'96 ◊ Международна конференция по "Промышленые системы" . . 127

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

P. KOVAČ: Zavisnost između habanja alata, temperature rezanja i režima rezanja ◊ Dependence between Tool Wear, Cutting Temperature and Cutting Regime ◊ Взаимозависимость изнашивания инструмента, температуры резания и режима резания 129

V. MARINKOVIĆ: Primena metoda sabijanja prstena za određivanje koeficijenta trenja u procesima zapreminskog deformisanja ◊ Application of The Ring Test Method for The Evaluation of The Coefficient of Friction in The Bulk Plastic Deformation Processes ◊ Использование метода "кольцевой осадки" для определения коэффициента трения при пластическом деформировании пластичных материалов 135

P. PETROVIĆ, S. JANKOVIĆ, LJ. MARKOVIĆ, R. GLIGORIJEVIĆ: Agresivnost metilestra i uticaj na habanje dizel motora ◊ Aggressiveness of The Methyl Esters And Their Influence on The Diesel Engine Wear ◊ Агрессивность метилэстра и его влияние на изнашивание дизельных двигателей 143

Đ. ERCEGOVIĆ, M. VELJIĆ: Značaj i mogućnosti određivanja koeficijenta trenja zemljišta o radne površine poljoprivrednih mašina ◊ Importance And Possibilities For Determination of The Friction Coefficient of The Soil Against The Working Surfaces of The Agricultural Machines ◊ Значение и возможности определения коэффициента трения грунта с рабочими поверхностями сельскохозяйственных машин 149

M. OGNJANOVIĆ, V. LAĆARAC: Pobuda buke klizanjem mašinskih delova ◊ Noise Excitation by Machine Elements Slipping ◊ Возбуждение шума при скольжении деталей машин 153

D. STOJANOVIĆ, D. IGNJATOVIĆ, S. IVKOVIĆ: Uticaj habanja zuba na efektivnost rada rotornih bagera ◊ Influence of The Tooth Wear on Rotational Excavators Working Efficiency ◊ Воздействие изнашивания зубьев на эффективность работы роторных экскаваторов 160

NOVOSTI
NEWS
НОВОСТИ 163

KNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ 164

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ 166

B. IVKOVIĆ

10. međunarodna konferencija "INDUSTRIJSKI SISTEMI - IS,96"

U organizaciji Instituta za industrijske sisteme Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu održana je, početkom oktobra 1996. godine, jubilarna, 10. međunarodna naučno-stručna konferencija "INDUSTRIJSKI SISTEMI - IS'96" na kojoj su saopšteni radovi iz skoro svih oblati inženjerskog rada i više graničnih disciplina, kakve su ekonomika, informatika i druge.

U tri publikacije štampano je ukupno 133 saopštenja među kojima se nalaze i 10 uvodnih izlaganja.

U prvoj publikaciji štampani su radovi iz oblasti projektovanja proizvodnih sistema, robotike, automatizacije i mehanotronike. Posebnu pažnju privuklo je uvodno izlaganje. Prof. dr G. Rezevskog (The Open University, UK) pod naslovom: Inteligentne mašine i sistemi - trendovi (Inteligent Machines and Systems-Trends) u kome su razmatrani mogući pravci daljeg razvoja u oblasti industrijskih sistema s obzirom na promene koje se dešavaju na polju organizacione teorije i prakse i u informacionoj tehnologiji.

Epilog uvodnog izlaganja Prof. dr D. Zelenovića:

PROIZVODNJA je fascinantno, uzbuđujuće, misaono u prvom redu, područje ljudske delatnosti. PROIZVODNJA je pravi posao za prave ljude. Od proizvodnje ljudi žive, stvaraju, obezbeđuju opstanak i razvoj. PROIZVODNJA traži znanje - ali još više SPOSOBNOST UČENJA, PROIZVODNJA je večna. PROIZVODNJA vezuje u sebi ljude, tehniku, organizaciju. Dobavljače i potrošače. Učesnike različitih kvalifikacija. PROIZVODNJA gradi naselja, ulice, puteve, gradove, mašine, računare, uređaje za domaćinstvo, papir, olovke, lekove, sredstva za odbranu, vodu za piće, čist vazduh - jednom rečju sve. PROIZVODNJI treba učiti decu kod kuće, u svim vrstama škola u društvu. PROIZVODNJA je častan pojam.

Pojam PROIZVODNJA treba uvek izgovarati sa dostojanstvom i označavati - pisati velikim crvenim slovima:

P R O I Z V O D N J A

Druga publikacija sadrži saopštenja iz oblasti Organizacije, Informaciono upravljačkih sistema i efektivnog menadžmenta. U uvodnom predavanju Prof. dr J. M. Kay-a (School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfild University, UK) pod naslovom: Rukovođenje promenama u industriji (Manage Changes in Manufacturing Industry) na neophodnosti neprekidnih promena u industrijskim sistemima jer se neprekidno menjaju tržište, tehnologija i što je možda najvažnije stavovi kupaca, snabdevača i zaposlenih radnika u preduzeću. Industrijski sistemi koji se menjaju samo onda kada dođu u krizu verovatno će poslovati neprekidno u krizi. Ovaj stav je u izlaganju obrazlagan na veoma ubedljiv način.

U trećoj publikaciji štampani su radovi iz oblasti Kvaliteta, Efektivnosti i Integralne sistemske podrške - Logistike. Uvodno izlaganje Prof. dr L. I. Vilkevič-a, koje nije štampano u celini, odnosilo se na ispitivanje mogućnosti povećanja efektivnosti industrijskih sistema.

Saopšteni i štampani radovi na ovoj Jubilarnoj desetoj međunarodnoj konferenciji o industrijskim sistemima pokzuje da se na našim prostorima nalaze već zreli timovi naučnih radnika, koji u godinama koje dolaze mogu svojim znanjima i sposobnostima da doprinesu, u značajnoj meri, razvoju domaćih industrijskih siste-

ma i učine ih konkurentnim na međunarodnom tržištu.

Uvodno izlaganje Prof. dr D. Zelenovića, predsednika programskog odbora Konferencije, odnosilo se na opštu problematiku proizvodnje u savremenim industrijskim sistemima. Ukazano je na programsku orijentaciju i rezultate rada Instituta za industrijske sisteme, koji je i organizator ove Konferencije i u kome je u najvećoj meri u našoj zemlji razvijen naučni pristup problemima industrijskog inženjerstva.

Epilog uvodnog izlaganja posvećen je proizvodnji na neuobičajen, i za naše prilike, izuzetno koristan način.

Okrugli sto koji je za vreme konferencije održan na temu Savremeni industrijski sistemi okupio je veliki broj učesnika koji su u trajanju od oko 2 h izlagali interesantne stavove o mogućnostima i pravcima razvoja industrijskih sitema u svetu i kod nas. Posebno je bio interesantan zaključak da budućnost pripada malim industrijskim sistemima. Slogan "Small is beautiful" (Malo je lepo) prihvata se sve više u industrijski razvijenim zemljama što dovodi do podele velikih industrijskih sitema na veći broj malih jedinica.

10. International Conference on Industrial Systems - IS'96

The Institute for Industrial Systems of The Faculty of Technical Sciences in Novi sad had organized in the beginning of October the Jubilee 10. International Scientific - Expert Conference on Industrial Systems - IS'96. The papers were presented from almost all areas of engineering work and several related disciplines, like economics, informatics, etc.

In three publications a total of 133 papers was published, among there are 10 plenary lectures.

Международна конференция по "Промышленые системы"

В организации Института по промышленым системам Технического факультета Университета в городе Новый Сад, в начале октября текущего года, состоялась Юбилейная 10. Международная конефрнция "Промышленые системы - ПС'96" на которой рассматрывались вопросы и представлены работы почти из свех областей инженерного дела и граничных дисциплин - экономики, информатики и др.

В трёх сборниках объявлены 133 работы среди которых и 10 вводных рефератов. Определённое число работ объявили на англійском языке, а остальные печатаны на сербском языке с резюме в англійском.

Svim našim čitaocima želimo srećnu i uspešnu 1997. godinu

Redakcija

UDK 621.9.015.004.6

P. KOVAČ

Zavisnost izmedju habanja alata, temperature rezanja i režima rezanja

ISTRAŽIVANJA

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja tokom kojih je vršeno merenje parametara habanja alata kao i merenje temperature rezanja pomoću veštačkog termopara. Ispitivanja su vršena uz variranje režima i uslova rezanja prema planu eksperimenta pri čemu je praćena vremenska promena parametara habanja alata i temperature rezanja. Obradom podataka dobijenih eksperimentom i uz korišćenje određene zavisnosti između habanja i temperature rezanja odredjena je funkcionalna zavisnost između temperature rezanja habanja alata i režima rezanja.

Ključne reči: *Habanje alata, temperatura rezanja, plan eksperimenta*

1. UVOD

Habanje alata je posledica opterećenja na kontaktnim površinama za vreme nastajanja strugotine. To nije samo pitanje mehaničkog opterećenja već takođe i termičkog, koje istovremeno deluje na alat i obradak i uzrokuje različite procese habanja. Ovi procesi su povezani sa određenim fizičko hemijskim reakcijama koji, pod uticajem temperatura rezanja i sila rezanja, pri određenim kombinacijama materijala alata i obradka, utiču više ili manje.

Neke poteškoće vezane za direktno merenje parametara habanja, zbog malih dimenzija zone rezanja, visokih pritisaka i temperatura na kontaktnim površinama, doveli su ka razvoju metoda za indirektno praćenje habanja alata. Da bi indirektno praćenje habanja alata bilo moguće, neophodno je odrediti zavisnosti između vrednosti tog parametra i habanja alata. Ovaj rad razmatra jednu takvu zavisnost između habanja alata, uslova pri rezanju i temperature rezanja.

Zahvaljujući razvoju i primeni metode merenja pomoću minijaturnog termopara moguće je direktno merenje temperature na kontaktu alat/strugotina. U radu [3] je merena maksimalna temperatura rezanja na sredini kratera habanja na alatu.

Može se uočiti da dolazi do porasta temperature rezanja sa vremenom rezanja. Ovaj porast ima isti trend nezavisno od diskretne tačke u blizini zone rezanja na kojoj se meri temperatura rezanja, tako da su krive promene na svim merenim tačkama u blizini zone rezanja među sobom paralelne [4].

Ovakva promena temperature se može objasniti prostiranjem temperaturskog polja u kojem povećanje intenziteta toplotnih izvora na grudnoj i leđnoj površini alata zbog povećanja habanja alata se na isti način reflektuje u svakoj tački zone rezanja gde su se nalazile merne tačke. Zbog toga se može pojaviti izvesno kašnjenje u ovim tokovima ali, zbog malih rastojanja između mernih tačaka, to vreme je vrlo kratko [3]. Za praktičnu realizaciju najpogodnije mesto za merenje temperature rezanja je na površini oslanjanja rezne pločice ispod kratera, kako je to realizovano i u ovom radu.

2. MATEMATIČKI MODEL ZA HABANJE ALATA I TEMPERATURU

Promena temperature rezanja (θi) [2], na određenim karakterističnim tačkama rezne pločice u funkciji parametra habanja se može matematički izraziti jednačinama sledećeg oblika:

$$\theta = e_1 + f_1 \cdot H_i \qquad (1)$$

ili

$$\theta = e_2 \cdot H_i \cdot p \qquad (2)$$

gde su: e_1, e_2, f_1, p - konstante a
H_i - izabrani parametar habanja

Habanje alata je funkcija režima rezanja i vremena:

$$H_i = F_1(v, s_z, \delta, t) \qquad (3)$$

Istraživanja pokazuju da je temperatura rezanja takođe funkcija režima rezanja i vremena:

$$\theta i = F_2(v, s_z, \delta, t) \qquad (4)$$

Dr Pavel Kovač, vanredni profesor
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Trg D. Obradovića 6

Ako vreme iz jednačine (3) izrazimo i zamenimo u jednačinu (4) dobija se zavisnost temperature rezanja od režima rezanja i izabranog parametra habanja:

$$\theta i = F_3(v, s_z, \delta, Hi) \qquad (5)$$

Za određivanje matematičkih modela u ovom radu je izabran parametar *VB* (širina pojasa habanja na leđnoj površini).

3. USLOVI PRI EKSPERIMENTU

Eksperimenti su izvedeni na čeliku za poboljšanje Č.1730 u normalizovanom stanju.

Kao rezni alat je korišćena glava za glodanje sa jednim zubom prečnika *125 mm*, sa pločicama od tvrdog metala SPAN 12 03 ER, kvaliteta P25. Geometrijski elementi reznog alata su za vreme eksperimenta bili konstantni: grudni ugao *7°*, napadni ugao *75°*.

Režimi razanja: brzina rezanja *v m/s*, pomak po zubu s_z *mm/zubu* i dubina rezanja δ *mm*, su varirani prema planu eksperimenta i prikazani su u tabeli 1.

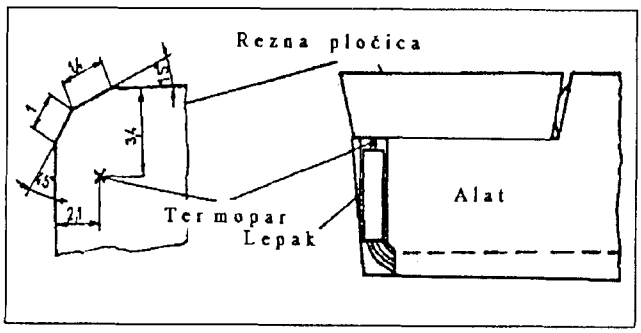
Istraživanja su izvedena na vertikalnoj glodalici snage pogonskog motora 14 kW.

Merenje parametara habanja alata na grudnoj i leđnoj površini vršeno je na Zeiss alatnom mikroskopu u toku prekida procesa rezanja.

Merenje promene temperature rezanja u toku procesa rezanja je izvršeno pomoću veštačkog termopara NiCr-Ni ugrađenog u sedište rezne pločice na mestu kako je to prikazano na slici 1.

Očitavanje vrednosti temperature rezanja vršeno je na Digitalnom termometru TR 2112, koji je snabdeven sa automatskom regulacijom hladnog spoja a zapisivanje izmerenih vrednosti je vršeno pomoću svetlosnog oscilografa.

Prenošenje signala sa rotirajućeg glavnog vretena je vršeno pomoću kliznih prstenova.



Slika 1. Položaj termopara

4. REZULTATI EKSPERIMENTA I NJIHOVA ANALIZA

Eksperimenti su izvedeni sa različitim režimima rezanja prema četvorofaktornom centralnom kompozicionom planu eksperimenta. U toku vremena rezanja mereni su: parametri habanja (širina pojasa habanja na leđnoj površini *VB*, širina kratera *KB* i dubina kratera *KT*) i temperature rezanja, a na osnovu njih su nacrtane njihove vremenske zavisnosti. Na slici 2 je prikazana vremenska promena parametara habanja alata a na slici 3 vremenska promena temperature rezanja. Sa slika se može videti da su vremenske promene parametara habanja slične krive na kojima se mogu uočiti tri karakteristične faze promene.

Na osnovu vremenskih zavisnosti habanja alata (slika 2) i temperature rezanja (slika 3) a za izabrane vrednosti režima rezanja i širine pojasa habanja prema planu eksperimenta, određene su vrednosti temperature rezanja (tabela 2).

Obradom eksperimentalnih podataka na računaru izvršena je regresiona analiza, disperziona analiza i određivanje intervala poverenja. Jednačina (5) posle obrade podataka glasi:

$$\theta = 139.495 \cdot v^{0.451} \cdot s_z^{0.273} \cdot \delta^{0.432} \cdot VB^{0.197} \qquad (6)$$

Tabela 1

Koeficijenti			
Regresija		Signifikantnost	
C	139.495	Fro	1994.67
x	0.4515	Fr1	72.60
y	0.2726	Fr2	25.82
z	0.4226	Fr3	208.34
v	0.1969	Fr4	47.12
Adekvatnost		Fr	1.51

Tablične vrednosti koeficijenata:

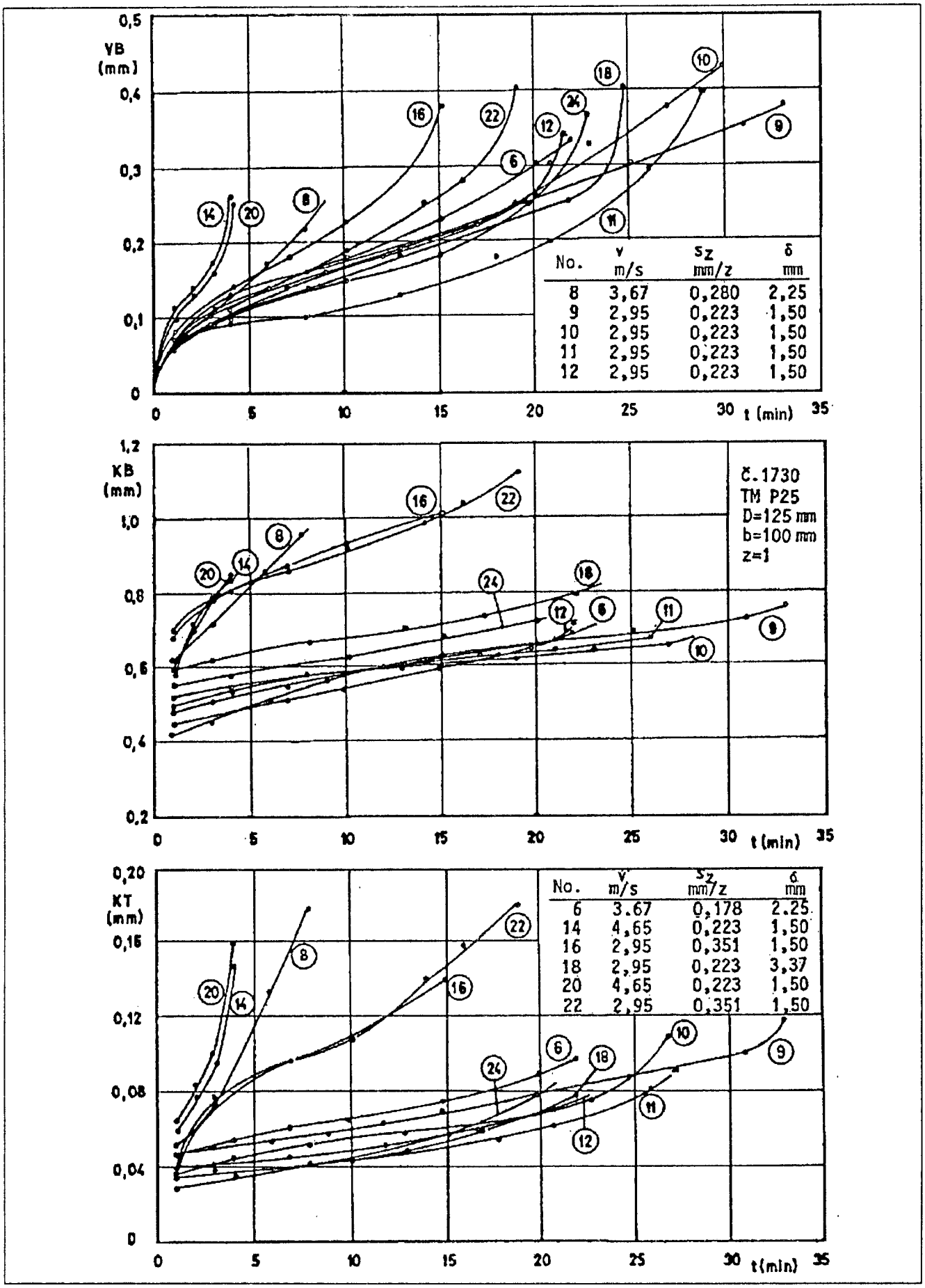
Signifikantnost: $Fri > Ft = 6.61$

Adekvatnost: $Frlf < Ft = 4.47$

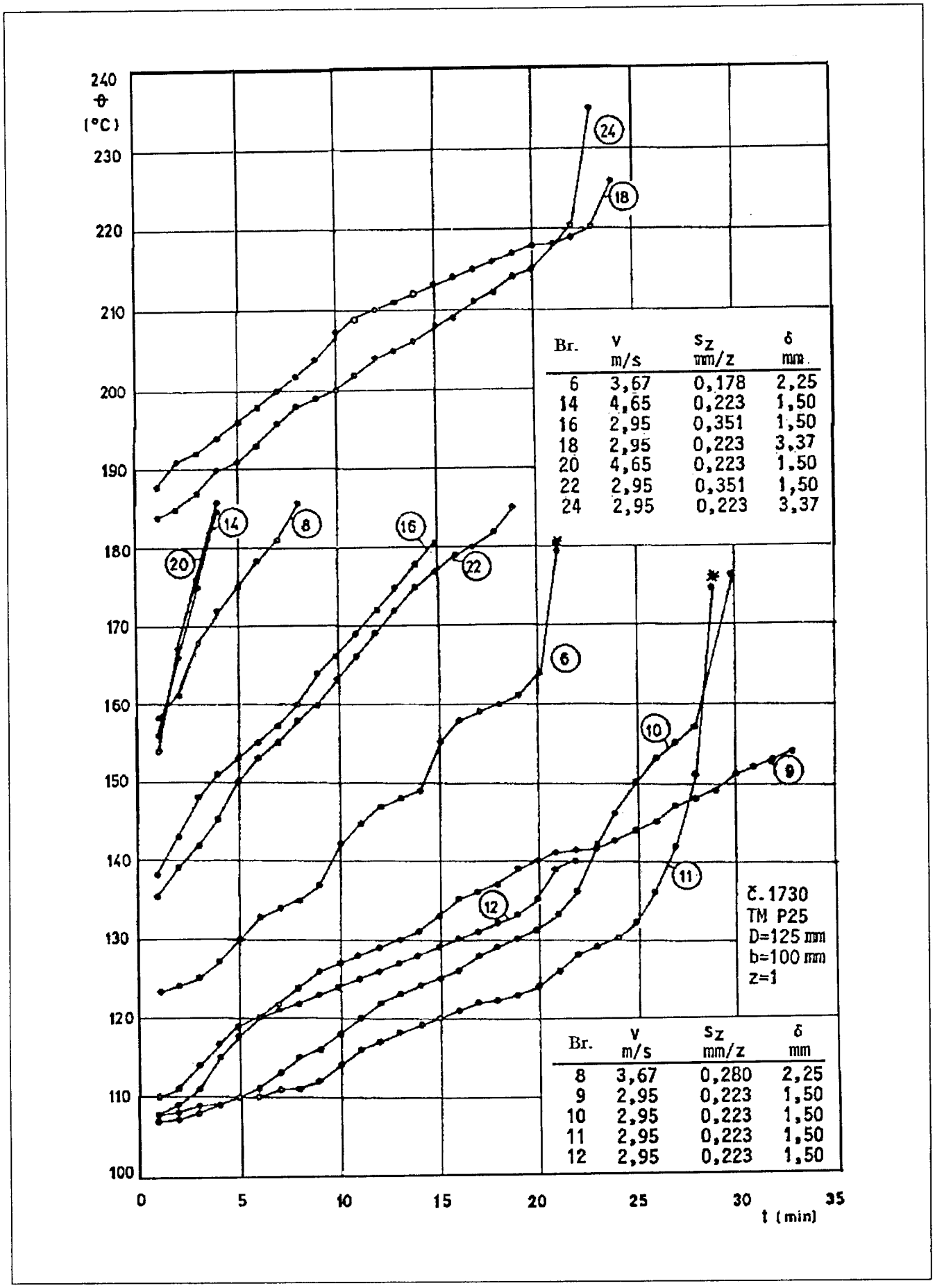
Na osnovu jednačine (5) može se odrediti zavisnost parametra habanja VB od režima rezanja i temperature.

$$VB = 1.301 \cdot 10^{-11} \cdot v^{-2.29} \cdot s_z^{1.39} \cdot \delta^{-2.19} \cdot \theta^{5,08} \qquad (7)$$

Ova jednačina je pogodna za upravljanje procesom jer se temperatura rezanja može lakše meriti nego habanje alata, i to kontinualno a zatim odrediti iznos habanja.



Slika 2. Parametri habanja



Slika 3. Temperatura rezanja na površini oslanjanja rezne pločice

Tabela 2

Br	Kodovi					Faktor				Temperatura	
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	s_z m/s	v mm/z	δ mm	VB mm	Rač °C	Mer °C
1	1	-1	-1	-1	-1	2.32	0.178	1.00	0.12	83.9	79
2	1	1	-1	-1	-1	3.67	0.178	1.00	0.12	103.2	106
3	1	-1	1	-1	-1	2.32	0.280	1.00	0.12	95.0	92
4	1	1	1	-1	-1	3.67	0.280	1.00	0.12	116.8	112
5	1	-1	-1	1	-1	2.32	0.178	2.25	0.12	119.2	115
6	1	1	-1	1	-1	3.67	0.178	2.25	0.12	146.6	130
7	1	-1	1	1	-1	2.32	0.280	2.25	0.12	134.9	125
8	1	1	1	1	-1	3.67	0.280	2.25	0.12	165.9	173
9	1	-1	-1	-1	1	2.32	0.178	1.00	0.28	99.2	102
10	1	1	-1	-1	1	3.67	0.178	1.00	0.28	122.0	126
11	1	-1	1	-1	1	2.32	0.280	1.00	0.28	112.2	104
12	1	1	1	-1	1	3.67	0.280	1.00	0.28	138.0	147
13	1	-1	-1	1	1	2.32	0.178	2.25	0.28	140.8	150
14	1	1	-1	1	1	3.67	0.178	2.25	0.28	173.2	161
15	1	-1	1	1	1	2.32	0.280	2.25	0.28	159;4	148
16	1	1	1	1	1	3.67	0.280	2.25	0.28	196.0	182
17	1	0	0	0	0	2.95	0.223	1.50	0.18	128.4	128
18	1	0	0	0	0	2.95	0.223	1.50	0.18	128.4	120
19	1	0	0	0	0	2.95	0.223	1.50	0.18	128.4	122
20	1	0	0	0	0	2.95	0.223	1.50	0.18	128.4	126
21	1	0	0	0	0	2.95	0.223	1.50	0.18	128.4	142
22	1	0	0	0	0	2.95	0.223	1.50	0.18	128.4	130
23	1	-2	0	0	0	1.83	0.223	1.50	0.18	103.5	117
24	1	2	0	0	0	4.65	0.223	1.50	0.18	157.7	167
25	1	0	-2	0	0	2.95	0.142	1.50	0.18	113.5	115
26	1	0	2	0	0	2.95	0.351	1.50	0.18	145.3	157
27	1	0	0	-2	0	2.95	0.223	0.67	0.18	90.6	88
28	1	0	0	2	0	2.95	0.223	3.37	0.18	182.2	205
29	1	0	0	0	-2	2.95	0.223	1.50	0.08	109.4	118
30	1	0	0	0	2	2.95	0.223	1.50	0.40	150.3	150

5. ZAKLJUČCI

Na osnovu napred izloženog mogu se doneti sledeći zaključci:

- Povećanje temperature rezanja u vremenu rezanja je značajno. Vremenska promena funkcije temperature rezanja je kompleksna i slična promeni habanja alata.
- Određen je matematički model temperature rezanja u funkciji parametra habanja alata VB i režima rezanja
- Parametri u matematičkom modelu su signifikantni a model je adekvatan.

LITERATURA

[1.] *Kovač, P., Milikić, D.*: **Teplota reznych ploch nastroja pri čelnom frezovani.** Naradie 3/86, Nove Zamky, 1986.

[2.] *Kovač, P.*: **Relationship Between Face Milling Process Parameters and Tool Wear.** Extended summaries of paper presented at the X-Th. ICPR, Nottingham, 1989.

[3.] *Milikić, D.*: **Temperatures on Characteristic Points of Carbide Inserts and their connection with Cutting Tool Wear,** VI-Th. IC.PR, Novi Sad, 1981.

[4.] *Kovač, P., Milikić, D.*: **Correlation Between Guting Temperature and Tool Wear.** Proceeding of CSME Mechanical Engineering Forum 1990, Vol. III, Toronto, 1990.

Dependence between Tool Wear, Cutting Temperature and Cutting Regime

In the paper are presented results of experimental investigations, during which the measuring was done of the wear parameters, as well as measuring of temperature, by application of the artificial thermocouple. The investigations were performed with varying the regime and conditions of cutting, according to the experiment's plan, where the time change was monitored of wear parameters and cutting temperature. By processing of data obtained by experiments, and with application of the certain relations between wear and cutting temperature, the functional dependence was determined between the cutting temperature, wear and cutting regime.

Взаимозависимость изнашивания инструмента, температуры резания и режима резания

В работе показаны результаты опытных исследований при которых проводили измерение параметров изнашивания инструмента и температуры резания используя искуственную термопару. Испытания проводили изменяя условия и режимы резания согласно плану эксперимента, при чём следили за временным изменением параметров изнашивания инструмента и режимов резания. На основании обработки полученных экспериментальных данных и использования определённой зависимости изнашивания от температуры резания, авторами получена функциональная взаимозависимость температуры резания, изнашивания инструмента и режима резания.

UDK 621.9.015.004.6

V. MARINKOVIĆ

ISTRAŽIVANJA

Primena metoda sabijanja prstena za određivanje koeficijenta trenja u procesima zapreminskog deformisanja

Iz velikog broja analitičko-eksperimentalnih metoda ispitivanja za odredjivanje koeficijenta trenja u radu je korišćen metod Burgdorf-a. Koeficijent trenja je procenjivan na osnovu Burgdof-ovog nomograma za nekoliko materijala i podmazivanja.

Koeficijent trenja je važan pokazatelj kvaliteta bilo kog podmazivanja. U tom smislu je definisan faktor kvaliteta maziva, to jest faktor koji se koristi za gradiranje maziva.

Ključne reči: *Koeficijent trenja, plastično deformisanje, metoda sabijanja prstena, mazivo*

1. UVOD

Kontaktno trenje egzistira praktično u svim procesima obrade materijala deformisanjem (OMD). Poznavanje zakona kontaktnog trenja predstavlja osnovnu pretpostavku za adekvatnu analizu, racionalizaciju, optimizaciju i upravljanje procesima OMD, kao i osvajanje novih tehnoloških procesa OMD i formiranje kontaktnih uslova pri analizi graničnih problema teorije plastičnosti.

Različitim vidovima dejstva (makroskopskim, mikroskopskim, molekularno-hemijskim) kontaktno trenje bitno utiče na formiranje oblika i veličinu zone plastičnih deformacija, na neravnomernost distribucije napona i deformacija po zapremini obratka, na veličinu smičućih napona i odnosa normalnih i smičućih napona, na veličinu sile i deformacionog rada, na kvalitet površina izratka, na habanje i vek trajanja alata. Drugim rečima, racionalnost i efektivnost procesa OMD u značajnoj meri zavise od veličine i prirode kontaktnog trenja.

Kontaktno trenje se pojavljuje i u mehaničkim sistemima pri relativnom kretanju elemenata frikcionih parova. Zato se fenomen kontaktnog trenja može izučavati uopšteno [1], [2] ili parcijalno u procesima obrade materijala rezanjem [3], [4] ili deformisanjem [5], [6], [7].

Ako se izuzmu neki posebni zahtevi kod konvencionalnih procesa OMD, gde je prisustvo kontaktnog trenja neophodno (npr.: pri dubokom izvlačenju za držanje venca obratka, pri valjanju za obezbeđenje transporta materijala (lima), pri vučenju cevi za držanje "*plivajućeg*" trna itd.), kao i neki specijalni postupci OMD sa "*aktivnim*" trenjem [5], [8], kontaktno trenje, u principu, nepovoljno utiče na ponašanje i efektivnost celog obradnog sistema.

Prema tome, jedan od najvažnijih zadataka teorije i tehnologije plastičnosti svodi se na smanjenje intenziteta sila trenja u procesima OMD. U tom smislu čine se ogromni istraživački napori u cilju pronalaženja adekvatnog maziva i čvrstih prevlaka pogodnih za upotrebu u procesima OMD u hladnom i toplom stanju.

2. SMIČUĆI KONTAKTNI NAPON I KOEFICIJENT TRENJA

Priroda kontaktnog trenja i njegov kvantitativno - kvalitativni uticaj na odvijanje procesa OMD najadekvatnije se može proučiti i utvrditi preko smičućeg kontaktnog napona (τ_k) i koeficijenta trenja (μ). Kao što će se pokazati između ovih veličina postoji jednoznačna veza.

Pri tome treba stalno imati u vidu da se za razliku od mehaničkog (mašinskog) trenja, gde se oba elementa frikcionog para tretiruju kao kruta tela, trenje u procesima OMD se karakteriše plastičnim deformisanjem jednog od elemenata firkcionog para, dok se drugi tretira kao kruto (nedeformabilno) telo. Zato se ovakvo trenje naziva "*deformaciono*" trenje ili "*plastično*" trenje.

Mnogobrojna istraživanja pokazala su da trenje u procesima OMD zavisi od dve vrste (grupe) faktora. U prvu grupu faktora spadaju oni koji su povezani sa fizičko - mehaničkim i hemijskim svojstvom površina obratka i

Prof. dr Velibor Marinović, dipl. ing.
Mašinski fakultet, Niš

alata, sa učešćem međukontaktnog medijuma (mazivo, oksidi, nečistoće i sl.). U drugu grupu spadaju faktori koji karakterišu promenu mehaničkih svojstava i naponsko - deformacionog stanja tela u prikontaktnoj površini.

Vrlo veliki broj istraživača je pokušavao da uspostavi eksplicitnu vezu između smičućeg napona na kontaktnim površinama obratka i alata i mnogobrojnih uticajnih faktora i njihovih interakcija. Imajući u vidu da u realnim procesima OMD egzistira, uglavnom, režim mešovitog trenja [5], [6], [7], [9], za potrebe inženjerskih proračuna u teoriji plastičnosti su do sada prihvaćena dva zakona (hipoteze) kontaktnog trenja.

Prvi je zakon Amontina - Kulona, koji se izražava jednostavnom relacijom:

$$\tau_k = \mu_n \cdot \sigma_n \qquad (1a)$$

gde je: σ_n - normalni napon (napon upravan na površinu kontakta frikcionih parova).

Drugi je zakon Zibela - Prantla, koji se, takođe, izražava veoma jednostavnom relacijom:

$$\tau_k = f \cdot k_s \qquad (1b)$$

gde su: f - faktor trenja ($0 \leq f \leq 1$),
k_s - plastična konstanta (maksimalni smičući napon).

Treba napomenuti da se u literaturi koeficijent proporcionalnosti u izrazu (1b) naziva još i "parametar" trenja i "koeficijent" trenja. Međutim, prema E. P. Unksovu koeficijentom trenja treba nazivati samo koeficijent proporcionalnosti u izrazu (1a). Takođe, treba imati u vidu da se često u literaturi u izraz (1a) umesto normalnog napona unosi prosečna vrednosti pritiska (p).

Domen primene pomenutih zakona obično se ograničava na dve oblasti; tako se može pisati:

$$a)\ \tau_k = \mu \cdot \sigma_n,\ \mu = const.;\ 0 \leq \sigma_n \leq \sigma^* = f \cdot k_s/\mu \qquad (2a)$$

$$b)\ \tau_k = f \cdot k_s,\ f = const.;\ \sigma^* \leq \sigma_n < \infty \qquad (2b)$$

Uopštavanjem eksperimentalnih rezultata dobijenih u širokom dijapazonu promene napona, deformacija, klizanja, temperaturno-brzinskih uslova i reoloških svojstava deformabilnih materijala A. N. Leonov je formulisao zakon trenja u obliku eksponencijalne funkcije [5]:

$$\tau_k = K_p \cdot [1 - exp(n \cdot \sigma_p/\sigma_{sk})] \cdot \tau_{sk} \qquad (3a)$$

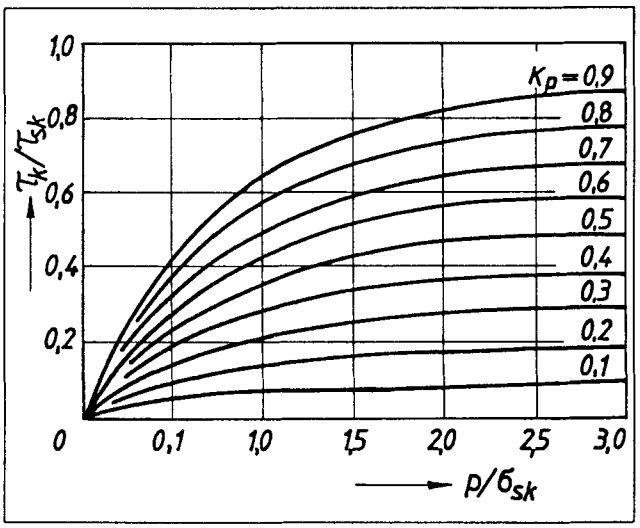
gde su: K_p - konstanta površine; određuje se eksperimentalno ($0 < K_p \leq 1$),
n - aproksimacioni koeficijenat; određuje se eksperimentalno
σ_p - geometrijski zbir normalnog i smičućeg napona,
σ_{sk}, τ_{sk} - otpor materijala deformisanju prikontaktnog sloja pri istezanju i čistom smicanju.

Za približno određivanje srednjeg napona trenja po celoj površini klizanja, uz pretpostavku da je σ_p = p, može se izraz (3a) svesti na jednostavniji oblik:

$$\tau_k = K_p \cdot [1 - exp(-1.25 \cdot p/\sigma_{sk})] \cdot \tau_{sk} \qquad (3b)$$

gde je: p - pritisak (srednja vrednost normalnog napona na posmatranoj kontaktnoj površini).

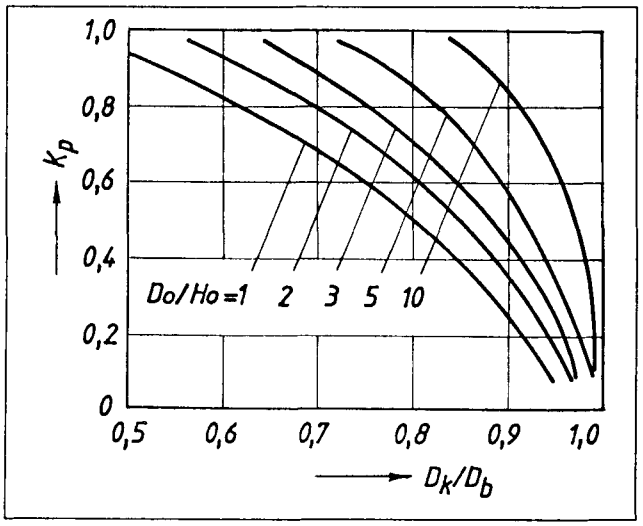
Zakon trenja izražen relacijom (3b) je prikazan u grafičkoj formi na slici 1.



Slika 1. Grafički prikaz jednačine (3b)

Konstanta površine (K_p) može se odrediti pomoću dijagrama datog na slici 2 [5]. Radi toga potrebno je i dovoljno izvesti nekoliko opita slobodnog sabijanja valjka (za date tribološke uslove) i izmeriti srednji prečnik čeone kontaktne površine (D_k) i prečnik najvećeg poprečnog preseka (D_b) sabijenog valjka. Pri tome se podrazumeva da se ista vrednost konstante površine treba da dobije za različite početne dimenzije valjaka (D_o/H_o).

U tablici 1 date su vrednosti konstante površine za slučajeve obrade u hladnom stanju za različite materijale i tribološke uslove.



Slika 2. Dijagram za određivanja konstante površine

Tablica 1.

MATERIJAL OBRADTKA*	MATERIJAL ALATA*	HRAPAVOST ALATA	VRSTA MAZIVA	KONSTANTA K_p
Alumijinum	Čelik (HRC 58-60) ŠH15	N10	Bez maziva	0.88
		N8		0.76
		N6		0.55
		N4		0.43
		N2		0.26
		N4	Mašinsko ulje	0.22
			Oleinska kiselina	0.16
			Solidol	0.10
			Natrijumski sapun	0.04
Al-legura AM3	Čelik (HRC 58-60) ŠH15	N10	Bez maziva	0.85
		N8		0.60
		N6		0.40
		N4		0.26
		N2		0.23
	5NHV (HRC 56-58)	N4	Mašinsko ulje	0.20
			Oleinska kiselina	0.16
			Solidol	0.12
			Natrijumski sapun	0.06
Al-legura D16t	Čelik (HRC 58-60) ŠH15	N10	Bez maziva	0.80
		N8		0.56
		N6		0.35
		N4		0.24
		N2		0.19
bakar M2	Čelik (HRC 58-60) ŠH15	N10	Bez maziva	0.66
		N8		0.43
		N6		0.28
		N4		0.19
		N2		0.17
		N4	Mašinsko ulje	0.17
			Oleinska kiselina	0.15
			Solidol	0.13
			Natrijumski sapun	0.08
Mesing L62	Čelik (HRC 58-60) ŠH15	N10	Bez maziva	0.62
		N8		0.40
		N6		0.25
		N4		0.18
		N2		0.16
Čelik 10kp	Čelik (HRC 58-60) ŠH15	N10	Bez maziva	0.70
		N8		0.48
		N6		0.33
		N4		0.23
		N2		0.19
	5NH13 (HRC 56-58)	N4	Mašinsko ulje	0.18
			Oleinska kiselina	0.16
			Solidol	0.15
			Natrijumski sapun	0.09
Čelik 45	5NHV (HRC 56-58)	N4	Bez maziva	0.22
			Mašinsko ulje	0.20
			Oleinska kiselina	0.18
			Solidol	0.17
			Natrijumski sapun	0.12
			Mašinsko ulje + grafit	0.19

* - *Oznake su prema standardu GOST*

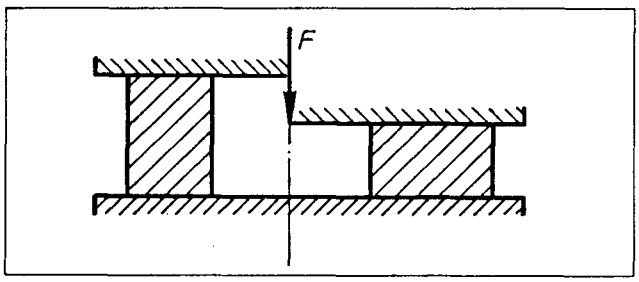
3. METODI ODREĐIVANJA KOEFICIJENTA TRENJA

Za teorijska istraživanja, simulaciju i upravljanje procesima OMD pogodno je poznavati vrednost koeficijenta trenja (μ) za date materijale i tribološke uslove.

Za određivanje koeficijenta trenja razvijen je veliki broj analitičko-eksperimentalnih metoda [5], [6], [8], [9]. Neki od njih zahtevaju primenu specijalnih uređaja, senzora i merne instrumentacije za snimanje i registrovanje pojedinih mernih veličina (sila, napon tečenja, dimenzija uzoraka). Drugi se, pak, zasnivanju na merenju samo dimenzija specijalnih uzoraka (epriveta) nakon deformisanja. Pri tome se za epruvete biraju jednostavni geometrijski oblici (valjak, prsten), a od mnogobrojnih postupaka deformisanja jedan od najjednostavnijih - slobodno sabijanje. Ovakavi eksperimentalno - analitički metodi za određivanje koeficijenta trenja mogu se realizovati u svakoj laboratoriji, zbog čega su i našli najveću primenu. Jedan od takvih metoda je i metod sabijanja prstenastih epriveta, razvijen od većeg broja autora [10], [11], [12], [13], [14], [15].

3.1. Metod M. Burgdorfa

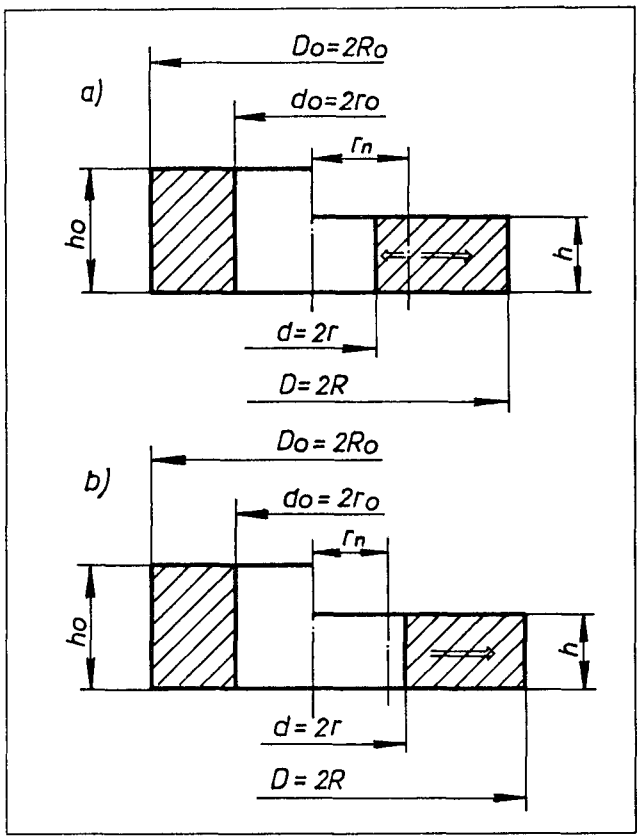
Metod M. Burgdorfa (kao i drugih autora) zasniva se na složenoj teorijskoj analizi procesa slobodog sabijanja prstenaste eprivete. Ovaj proces je u idealizovanom pojavnom obliku pirkazan na slici 3. Naime, kao što je poznato, cilindrične površine omotača prstena (spoljašnja i unutrašnja) pri sabijanju zbog prisustva sila trenja gube cilindričnu formu. Zato se pri određivanju spoljašnjeg i unutrašnjeg prečnika prstena nakon sabijanja mora računati sa srednjim prečnikom po visini prstena.



Slika 3. Slobodno sabijanje prstena

Suština i cilj pomenute teorijske analize sastoji se u određivanju radijusa "*neutralne*" površine (rn). "*Neutralna*" površina jeste površina razdvajanja tečenja materijala pri slobodnom sabijanju prstena (sl. 4a), mada radijus "neutralne" površine nože biti i fiktivnog karaktera (sl. 4b).

Eksperimentalno je utvrđeno da se slučaj sa sl. 4a pojavljuje pri sabijanju u režimu suvog trenja ili pri deformisanju u toplom stanju pri slabom podmazivanju, dok je slučaj sa sl. 4b karakterističan za sabijanje u hladnom stanju pri kvalitetnom podmazivanju.



Slika 4. Tečenje materijala pri slobodnom sabijanju prstena

Za unapred izabrane dimenzije prstenaste epruvete M. Burgdorf je numeričkim postupkom (za različite vrednosti koeficijenta i stepene sabijanja) odredio dimenzije sabijenog prstena i na osnovu toga konstruisao odgovarajući nomogram (sl. 5).

Za određivanje vrednosti koeficijenta trenja potrebno je izvršiti sabijanje nekoliko prstenastih epruveta, datih početnih dimenzija (D_o/d_o, h_o), sa različitim stepenima deformacije, izmeriti njihove karakteristične dimenzije (d, h) i ove vrednosti (koordinate) uneti u nomogram M. Burgdorfa.

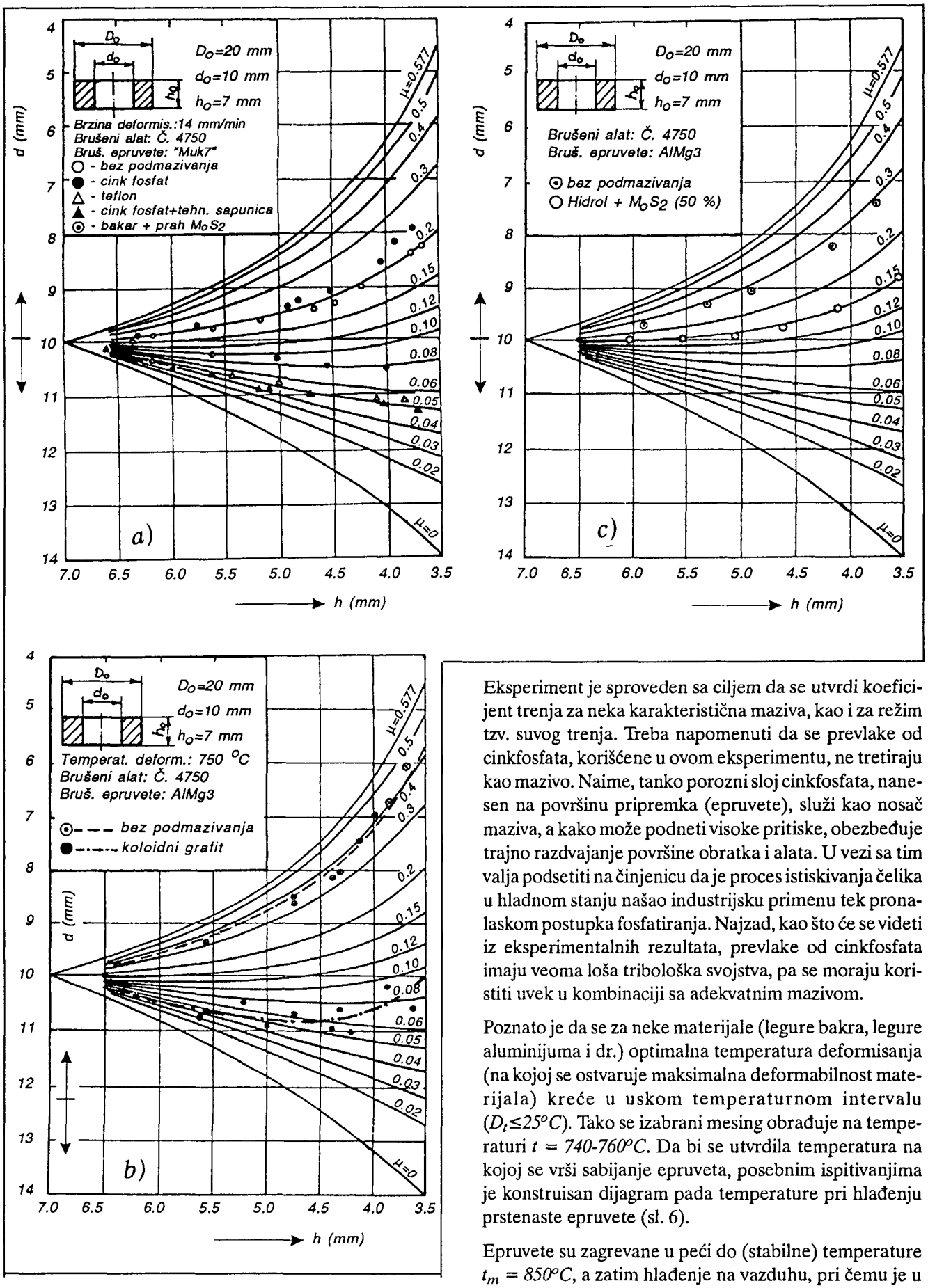
Etalon - kriva koja je najbliža eksperimentalnim tačkama pokazuje vrednost koeficijenta trenja za izabrane tribološke uslove.

3.2. Izvođenje eksperimenta

Određivanje koeficijenta trenja po metodi M. Burgdorfa vršeno je za različite materijale i različite tribološke uslove.

Kao materijal koji se odlikuje viskokom deformabilnošću pri obradi u hladnom stanju izabrani su niskougljenični čelik "Muk 7" (u mekožarenom stanju) i aluminijuska legura $AlMg_3$. Kao materijal koji se široko primenjuje za razna oblikovanja u toplom stanju izabran je mesing $CuZn_{37}Pb_2$.

Od ovih materijala izrađene su pristenaste epruvete propisanih dimenzija, sa minimalnim odstupanjem mera ($d < \pm 0,1$ *mm*). Epruvete su (kao i radne površine alata) brušene.

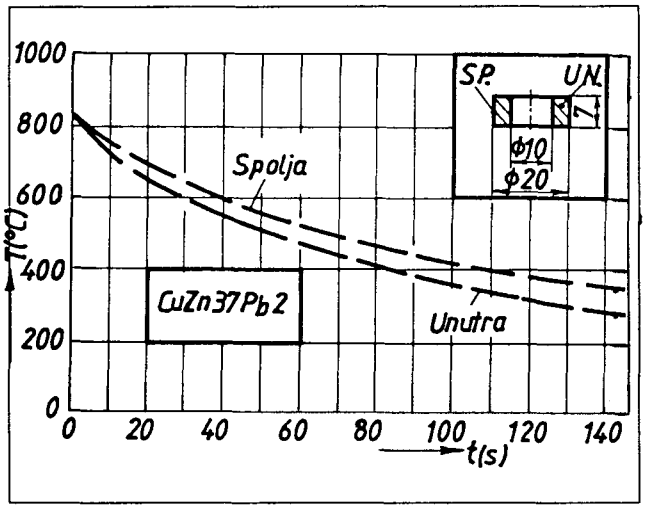


Slika 5. Nomogram Burgdorfa za određivanje koeficijenta trenja

Eksperiment je sproveden sa ciljem da se utvrdi koeficijent trenja za neka karakteristična maziva, kao i za režim tzv. suvog trenja. Treba napomenuti da se prevlake od cinkfosfata, korišćene u ovom eksperimentu, ne tretiraju kao mazivo. Naime, tanko porozni sloj cinkfosfata, nanesen na površinu pripremka (epruvete), služi kao nosač maziva, a kako može podneti visoke pritiske, obezbeđuje trajno razdvajanje površine obratka i alata. U vezi sa tim valja podsetiti na činjenicu da je proces istiskivanja čelika u hladnom stanju našao industrijsku primenu tek pronalaskom postupka fosfatiranja. Najzad, kao što će se videti iz eksperimentalnih rezultata, prevlake od cinkfosfata imaju veoma loša tribološka svojstva, pa se moraju koristiti uvek u kombinaciji sa adekvatnim mazivom.

Poznato je da se za neke materijale (legure bakra, legure aluminijuma i dr.) optimalna temperatura deformisanja (na kojoj se ostvaruje maksimalna deformabilnost materijala) kreće u uskom temperaturnom intervalu ($D_t \leq 25^oC$). Tako se izabrani mesing obrađuje na temperaturi t = *740-760°C*. Da bi se utvrdila temperatura na kojoj se vrši sabijanje epruveta, posebnim ispitivanjima je konstruisan dijagram pada temperature pri hlađenju prstenaste epruvete (sl. 6).

Epruvete su zagrevane u peći do (stabilne) temperature t_m = *850°C*, a zatim hlađenje na vazduhu, pri čemu je u istim vremenskim intevalima merena temperatura epruvete. Merenje je vršeno veštačkim termoparom (preciz-



Slika 6. Kriva hlađenja prstenastih epruveta od CuZn37Pb2

nosti $d_o \pm 0.2°C$). Na osnovu više ponovljenih opita konstruisan je pomenuti dijagram. Takođe, višestrukim probama je utvrđeno da do početka procesa deformisanja protekne oko 10 sekundi, što znači da je temperatura deformisanja bila $t_d \approx 750°C$. Pri sabijanju je zagrevan i alat ($t_a \approx 450°C$), kako se to inače čini u realnim uslovima obrade.

Za svaki materijal i mazivo opit sabijanja prstenastih epriveta je (pod istim uslovima) ponavljan više puta, za različite stepene deformacije. Odgovarajuće dimenzije sabijenih epruveta (za svaku seriju opita) su unete u nomogram Burgdorfa (sl. 5).

3.3. Analiza eksperimentalnih rezultata

Na osnovu opisanog eksperimentlanog postukpa određeni su koeficijenti trenja za date tribološke uslove, a rezultati dati u tablici 2. Ovde treba napomenuti da su podaci za koeficijente trenja, koji se odnose na mesing, korigovani.

Naime, pri kontaktu epruveta sa alatom dolazi do izvesnog pada temperature, pri čemu se menjaju i plastične karakteristike prikontaktnog sloja.

Temperatura kontakta može se odrediti po obrascu [16]:

$$\tau_k = \theta \cdot (t_d - t_a) + t_a \qquad (4)$$

gde je: θ- toplotni parametar.

Eksperimentalno određivanje koeficijenta trenja se onda redukuje uvođenjem popravnog koeficijenta:

$$\xi = exp[m \cdot (t_d - t_k)] \qquad (5)$$

gde je: m - koeficijent; karakteriše zavisnost deformacionog otpora materijala od temperature.

Tablica 2

Materijal	Temper. deformis.	Vrsta maziva	μ
Ugljenični čelik Muk 7	20°C	Bez maziva	0.19
		Zn - fosfat	0.22
		Zn - fosfat + tehn. sapun	0.045
		Bakar+ MoS_2 (prah)	0.088
		Teflon	0.052
Mesing CuZn37Pb2	750°C	Bez maziva	0.29
		Koloidni grafit	0.036 - 0.058
AlMg3	20°C	Bez maziva	0.285
		Hordol + MoS_2 (prah)	0.15

Ako se za date uslove usvoji da je $\theta \approx 0.7$ i $m \approx 0.0035$, tada se na osnovu izraza (4) i (5) dobija:

$$tk \approx 660°C, \ \xi \approx 1,37.$$

Inače, efektivnost nekog maziva može se proceniti koeficijentom:

$$\lambda = \mu_s / \mu_m \qquad (6)$$

gde su: μ_s, μ_m - koeficijenti trenja, pri režimu suvog trenja i pri korišćenju maziva, respektivno.

Vrednosti koeficijenta efektivnosti navedenu su u tablici 3.

Tablica 3

Materijal	Temper. deformis.	Vrsta maziva	λ
Ugljenični čelik Muk 7	20°C	Zn - fosfat + tehn. sapun	4.22
		Bakar+ MoS_2 (prah)	2.20
		Teflon	3.65
Mesing CuZn37Pb2	750°C	Koloidni grafit	5.0 - 8.1
AlMg3	20°C	Hirdol + MoS_2 (prah)	1.90

Kvalitet nekog maziva može se proveriti jednostavnim opitom slobodnog sabijanja cilindrične epruvete (valjka).

Kao što je poznato, zbog prisustva sila kontaktnog trenja, valjak pri sabijanju poprima karakteristični "*buričasti*" oblik. Distrozija aksijalnog preseka valjka raste sa povećanjem koeficijenta trenja.

Za idealni slučaj sabijanja bez trenja ($\mu = 0$) valjak zadržava cilindrični oblik, te je tada deformisanje homogeno, a naponsko stanje linearno (jednoosno). Zato se postupak slobodnog sabijanja valjka, podmazanog kvalitetnim mazivom, najčešće koristi kao metod za određivanje kri-

vih ojačanja materijala za obradu u hladnom i toplom stanju. Pri tome se pretpostavlja da je napon tečenja (K) jednak radnom pritisku sabijanja (p). Greška koja se pri tome čini može se odrediti po obrascu E. Zibela:

$$p = K \cdot \left(1 + \frac{\mu}{2} \cdot \frac{D}{H}\right) \qquad (7)$$

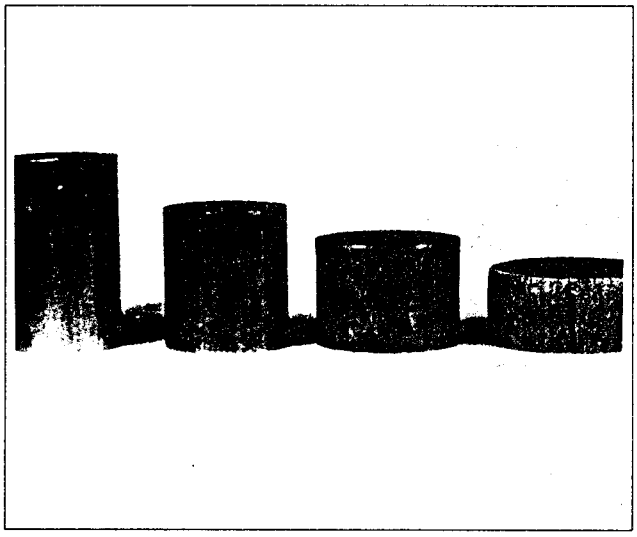
gde je: D/H - tekući odnos prečnika i visine valjka.

Za uobičajene granične odnose pri slobodnom sabijanju valjka ($D_o/H_o \leq 2$, $D1/H1 \leq 3$, $\varepsilon \leq 0.7$) uz pretpostavku da se kao mazivo koristi teflonska folija ($\mu = 0.052$), na osnovu obraca (7) se dobija:

$$p \leq 1.05 \cdot K$$

Dakle, upotrebom teflonske folije graška koja se čini pri određivanju napona tečenja (K) je dopuštena za praktične proračune.

Adekvatna ilustracija visokih mazivinih svojstava teflonske folije data je na slici 7. Stepen distorzije ("*buričastost*") aksijalnih preseka sabijenih uzoraka od legure AlMg3 je, očigledno, zanemarljivo mali.



Slika 7. Izgled sabijenih cilindričnih uzoraka od AlMg3 pri podmazivanju teflonskim folijama

4. ZAKLJUČAK

Određivanje koeficijenta trenja po metodu slobodnog sabijanja prstena može se smatrati dovoljno pouzdanim, pa se tako dobijene vrednosti za koeficijent trenja mogu koristiti pri proračunu svih operacija obrade zapreminskim deformisanjem.

Izvesna odstupanja eksperimentalnih rezultata od etalon - krivih u nomogramu Burgdorfa zapažena su u području velikih stepena deformacije (malih visina sabijenih prstenastih epruveta) i, naročito, za slučajeve deformisanja u toplom stanju. Ova pojava se može objasniti promenom triboloških uslova pri sabijanju sa većim stepenima deformacije. Naime, tada znatan deo bočne površine uzorka (epruvete) prelazi u kontaknu, a istovremeno se i temperatura deformisanja povećava. Pri tome može doći do prekida "filma" maziva, dok se mazivna svojstva mnogih maziva, po pravilu, pogoršavaju.

U području velikih stepena deformacija zapažena je i veća disperzija eksperimentalih rezultata, što je posledica izraženog uticaja anizotropije materijala i "*anizotropije*" trenja, odnosno distrozije poprečnog preseka, pa time i uvećanih grešaka pri merenju.

Za poređenje i procenu kvaliteta pojedinih maziva za obradu konkretnih materijala u hladnom ili toplom stanju pogodno je koristiti koeficijent efektivnosti maziva, kako je to učinjeno u ovom radu.

Za egzaktne proračune i analizu procesa OMD može se preporučiti primena eksponencijalnog zakona trenja A. N. Levanova. Tada je potrebno umesto koeficijenta tranja (μ) eksperimentalno odrediti konstantu površine (K_p) za date tribološke uslove.

LITERATURA

[1] *Крагельский И. В.*, **Основы расчетов на трение и износ**, "Машиностроение", Москва, 1977.

[2] *Bowden F. P., Tabor D.*, **The Friction and Lubrication of Solids**, Oxford at the Clarendon Press, 1958.

[3] *Ivković B.*, **Tribologija rezanja - sredstva za hlađenje i podmazivanje**, "Građevinska knjiga", Beograd, 1979.

[4] *Sovilj B.*, **Identifikacija triboloških porcesa pri odvalnom glodanju**, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1988.

[5] *Леванов Н. А., Бойцов В. В. и др.*, **Контактное трение в процессах обработки металлов давлением**. "Металлургия", Москва, 1976.

[6] *Schey J.*, **Metal Deformation Processes: Friction and Lubrication**, Marcel Dekker Inc., New York, 1970.

[7] *Чертавских А. К., Белосевиъ В.,.*, **Трение и технолоигческоя смазка при обработке металлов давлением**, "Металургия", Москва, 1968.

[8] *Охрименко Й. М., Тюрин В. А.*, **Тероийа процессов ковки**. "Висшая школа", Москва, 1977.

[9] *Marinković V., Milić D.*, **Priroda kontaktnog trenja u procesima obrade materijala deformisanjem i metodi određivanja sile i koeficijenata trenja**. Institut Mašinskog fakulteta u Nišu, Niš, 1993.

[10] *Male A. T, Cockroft M. G.*, **A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation**, J. Inst. Met Vol. 93, 38, 1965.

[11] *Burgdorf M.*, **Über die Ermittlung des Reibunswertes für Verfahten der Massivumformung durch den Ringstauchversuch**, "Industrie-Anzeiger", 89, No 39, 1967.

[12] *Hawkyard J. B., Jonson W.*, **An Analysis of the Changes in Geometry of a Short Hollow Cylinder During Axial Compression**, Int. J. Mech. Sci. Vol. 9, 1967.

[13] *Garmong G., Paton N. E.*, at all., **An Evaluation of the Ring Test for Strain-Rate-Sensitive Materials.** Met.Trans A, Vol. 8A, 1977.

[14] *Dankert J.*, **Analysis of the Ring Test Method for the Evaluation of the Frictional Stresses in Bulk Metaal Forming,** Annals of the CIRP, Vol, 37/1/1988.

[15] *Герчиков А. Б., Калпин Ю. Г. Елисеев Г. В.*, **Исследование смазок для горячей штамповки. "Кузнечно - штамповачное производство",** No 44, 1977.

[16] *Агапов Н. А., Бояцов В. В.*, **Заштитно - смазочные покрытия для изотермической штамповски заготовак из штампановых сплавов и сталей. "Кузнечно - штамповачное производство",** No 6, 1977.

Application of The Ring Test Method for The Evaluation of The Coefficient of Friction in The Bulk Plastic Deformation Processes

From a great number of the ring test method for the evaluation of the coefficient of friction in the paper the method by Burgdorf has been used. The coefficient of friction has been estimated by means of Burgdorf's nomogram for several materials and lubrications.

The coefficient of friction is the most important indicator of the quality of any lubrication. In that sense the factor of the lubricant quality has been defined, that is the factor used for grading lubricants.

Использование метода "кольцевой осадки" для определения коэффициента трения при пластическом деформировании пластичных материалов

Среди большого числа кольцевых методов исследования коэффициента трения в работе использовали метод Бургдорфа. Коэффициент трения оценивали на основании номограммы за нескольких материалов при применении различных смазок.

Коэффициент трения является важнейшим показателем качества любого вида смазки. По этому при исследовании определили фактор качества смазки, т.е. фактор используемый для градуирования смазок.

UDK 621.9.015.004.6

P. PETROVIĆ, S. JANKOVIĆ, LJ. MARKOVIĆ, R. GLIGORIJEVIĆ

Agresivnost metilestra i uticaj na habanje dizel motora

Razvoj i proizvodnja alternativnih goriva dizel motora imala je za potrebu sveobuhvatna istraživanja uticaja njihove primene na sklopove dizel motora. U Institutu IMR-a obavljena su motorska i vanmotorska ispitivanja, kao i detaljne analize ostalih uticajnih činioca goriva koji potiču iz njegovih fizičko-hemijskih karakteristika.

Uporednom analizom primene metilestara u odnosu na primenu mineralnih goriva u dizel motorima, identifikovani su problemi, koji su nastali primenom metilestara.

U ovom radu prezentiran je jedan deo istraživanja koji se odnosi na uticaj triboloških karakteristika i agresivnih svojstava metilestara na sklopove dizel motora.

Ključne reči: *Metilestar, alternativno gorivo, dizel motor, repičino ulje, biodizel*

1. UVODNA RAZMATRANJA

Demografske procene UN-a predviđaju da će 2005 god. Svetska populacija iznosti 7, a 2020 godine 8 milijardi stanovništva. Takvo demografsko predviđanje, dovešće do rasta broja automobila u svetu, tako da se predviđa da će 2020 godine biti oko 1.2 milijarde, u odnosu na sadašnjih 500 miliona. Takav brzi rast automobila, prouzrokovaće i povećanje potrošnje energenata mineralnog porekla. Na osnovu dokazanih i procenjenih resursa nafte, smatra se da će do 2050 godine te količine biti dovoljne (366 biliona tona).

S obzirom na takvu realnost, u svetu su sve aktuelniji trendovi istraživanja konvencionalnih goriva. Međutim, takva rešenja moraju zadovoljiti mnogobrojne zahteve sa aspekta funkcionalnosti pouzdanosti, performansi, ekoloških zahteva, konkurentnosti, obima proizvodnje i dr.

Istraživanja primene alternativnih goriva na bazi biomasa za primenu na dizel motorima nisu novijeg datuma i prva eksperimentalna ispitivanja datiraju još iz početka ovog veka, odnosno iz perioda kada je Rudolf Diesel (1858.-1913. godine) eksperimentisao sa uljem kikirikija i nešto kasnije kada je Fujlo Nagao 1948. godine uspeo da realizuje rad dizel motora sa uljem od bora.

Mr. Predrag Petrović, dipl. ing.,
Dr Slobodan Janković, dipl. ing.,
Ljubiša Marković, dipl. ing.,
Dr Radinko Gligorijević, dipl. ing.
Industrija motora Rakovica, IRJ Razvoj, Beograd

U novije doba, dva naftna šoka zbog povećanja cena (1973. i 1979. godine) inicirala su interesovanja u svetu na usavršavanju energetskih izvora na bazi biljnog ulja, odnosno biljnih estara ulja od repice, suncokreta, soje, ricinusa, palme, kokosa, kikirikija i dr.

U Institutu IMR vršena su ispitivanja dizel motora primenom goriva na bazi metilestara ulja repice. Ispitivanja su obuhvatala motorska (funkcionalne karakteristike, emisija izduvnih gasova, homologaciona ispitivanja) i vanmotorska ispitivanja (sistema za ubrizgavanje goriva, operatibilnosti goriva i hladnog starta, agresivnih svojstava na gumene i druge zaptivke ulje, farbu, klipni sklop i dr.

2. KARAKTERISTIKE REPIČINOG METILESTRA (RME)

Istraživanja primene biogoriva usmeravaju se uglavnom u dva osnovna pravca, i to:

- proizvodnja alkohola (etanola) na bazi skroba i šećera. Osnovu čine šećerna trska, šećerna repa, žito, krompir i sl.
- proizvodnja ulja na bazi uljanih kultura kao što su: uljana repica, suncokret, soja, palma i dr.

Sa aspekta biogoriva za dizel motore aktuelna je proizvodnja ulja, koja se u suštini sastoji iz tri faze:

- standardnim postupkom vrši se presovanje zagrejanog semena i ekstrakcijom odvajanje ulja;
- dobijeno ulje oplemenjuje se metilalkoholom postupkom reesterifikacije uz dodavanje natrijuma ili kali-

jum-hidroksida, kao katalizatora i praktično pretvara se u biodizel;

- u nastavku procesa u reaktorima se vrši raslojavanje (fosforno-kalijevo đubrivo, lož ulje, glicerin, voda, metilalkohol i dr.)

Za buduća istraživanja obe grupe mogu biti interesantne, ali sa aspekta ekonomičnosti primena i proizvodnja metilestara na bazi biljnih ulja je u sadašnjem trenutku najrealnija.

Biljno ulje+metanol (trigliceridi) — estri+glicerin

1t 0.1t — 1t 0.1t

$$\begin{array}{lll} CH_2 & OCOR_1 & \\ CH - OCOR_2 + 3CH_3OH & \rightarrow & R_2COOCH_3 + CH\text{-}OH \\ CH_2 - OCOR_3 & & \end{array}$$

R_1COOH_3 $CH_2 - OH$

R_3COOCH_3 $CH_2 - OH$

R - lanci ugljovodonika od 11-17 atoma

Šematski prikaz hemizma biljnog ulja, odnosno procesa esterifikacije dat je formulom:

U tabeli 1 dat je uporedni prikaz karakteristika goriva repičinog metilestra i dizel goriva.

Tabela 1

Red. broj	Karakteristike	RME	Dizel gorivo
1.	Gustina (20°C) [kg/l]	0.876	0.821
2.	Viskozitet (20°C) [mm^2/s]	7.19	4.01
3.	Cetanski broj	54	52
4.	Toplotna moć [MJ/kg]	37.02	43.47
5.	CFPP [°C]	-8	-15
6.	Sumpor [m%]	<0.02	0.26
7.	Tačka paljenja [°C]	>100	~60
8.	Tačka zamućenja [°C]	-1	+6 do -12
9.	Temperatura filtrabilnosti	-1	+6 do -12

Ispitivanjem dizel motora sa primenom repičinog metilestra kod nas i u Svetu došlo se do zaključka da se poliaromatski ugljovodonici (PAH), nesagoreli ugljovodonici (HC), SO_2 i acetaldehidi poboljšavaju, dok podaci npr. za CO pa čak i za HC dosta variraju, prema nekim podacima se smanjuju, a nekim povećavaju, dok se NO_x uglavnom povećava. Formaldehidi postaju problem naročito pri hladnom startu i leru. Benzol se takođe povećava i verovatno zbog nezasićenih jedinjenja stvorenih u toku, toplotnog razlaganja, koja su nepoželjna.

Prema podacima iz literature i buka motora primenom RME je nešto manja u odnosu sa primenom D2.

3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

U okviru verifikacije primene repičinog metilestra kao pogonskog goriva dizel motora u Institutu Industrije motora Rakovica vršena su mnogobrojna eksperimentalna ispitivanja koja su obuhvatala sledeće

- funkcionalna ispitivanja na motorima sa direktnim ubrizgavanjem (DM33) i sa indirektnim ubrizgavanjem (M33)
- emisija izduvnih gasova po Pravilniku ECE R-49, korišćenjem standardnog 13-to stupnog kontrolnog testa na motoru DM33 i dima po metodama BOSCH i HARTRIDGE
- homologaciona ispitivanja na motoru sa indirektnim ubrizgavanjem M33-250h i sa direktnim DM33-350h, na režimima punog opterećenja
- vanmotorska ispitivanja sistema za ubrizgavanje goriva u trajanju 500h
- ispitivanje "operatibilnosti" goriva i hladnog starta motora
- ispitivanje ulja i
- motorska i vanmotorska ispitivanja agresivnosti repičinog metilestra na komponente motora.

U daljem izlaganju dat je kraći osvrt rezultata ispitivanja, na tribološka i agresivna svojstva komponenata dizel motora.

3.1. Uticaj repičinog metilestra na tribološka svojstva klipnog sklopa

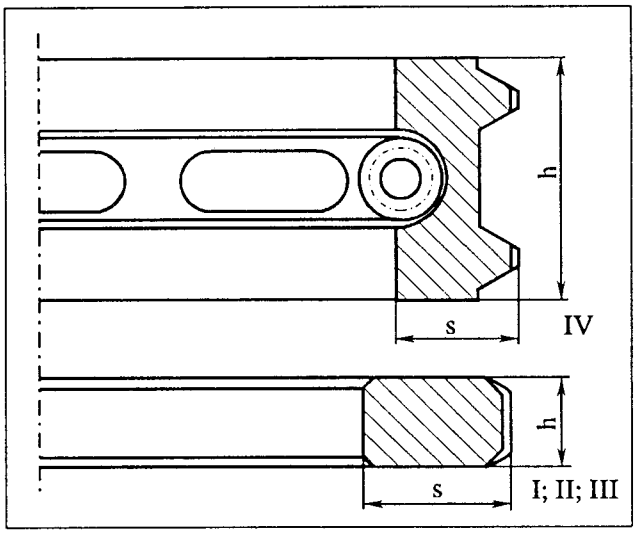
Ova ispitivanja su obavljena u okviru homologacionih ispitivanja dva tipa dizel motora Industrije motora Rakovica i to sa indirektnim ubrizgavanjem M33 pri radu od 250h i na direktnim ubrizgavanjem DM33 pri radu od 350h, pri punom opterećenju.

Pre ispitivanja izvršena su mikrometražna merenja klipnih prstenova, žljebova u klipu klipnih prstenova i košuljica cilindra. Merenja su obavljena prema standardnoj metodologiji IMR-a, koja su obuhvatala merenje promene visine (h), radijalne debljine (S) i težine (G) klipnih prstenova zatim promenu visine (h) žljebova u klipu klipnih prstenova i promenu prečnika košuljica cilindra na različitim visinama.

Znači takva mikrometražna merenja su obavljena pre i posle ispitivanja sa primenom goriva od repičinog metilestra (RME) dobijeni rezultati su upoređeni sa istrošenjima istih parametara primenom dizel goriva (D2) pri identičnim uslovima ispitivanja i osvrtom na dozvoljene kriterijume ispitivanja.

3.1.1. Istrošenja klipnih prstenova

Srednje vrednosti istrošenja klipnih prstenova pre i posle ispitivanja primenom repičinog metilestra date su u tabeli 2, a prema slici 1.



Slika 1. Merne veličine klipnog prstena: kompresioni prsten (I, II i III); strugač (IV)

U tabeli 2a dati su isti parametri istrošenja klipnih prstenova, jednog od dva ispitivana motora (DM33), pri radu od 500h sa dizel gorivom (D2), i kriterijum istrošenja za iste uslove ispitivanja.

Iz prikazanih srednjih vrednosti istrošenja klipnih prstenova može se konstatovati da istrošenja nisu intenzivnijeg karaktera primenom repičinog metilestra u odnosu na istrošenja primenom dizel goriva D2.

3.1.2. Istrošenja žljebova klipa

Srednje vrednosti istrošenja žljebova u klipu klipnih prstenova date su u tabeli 3, a prema slici 2.

U tabeli 3 date su i srednje vrednosti istrošenja jednog od ispitivanih motora DM 33-500h, sa primenom dizel goriva D2 i kriterijumi istrošenja za iste uslove ispitivanja.

Istrošenja žljebova klipova sa primenom repičinog metilestra su neznatna u odnosu na kriterijum istrošenja sa primenom dizel goriva (D2).

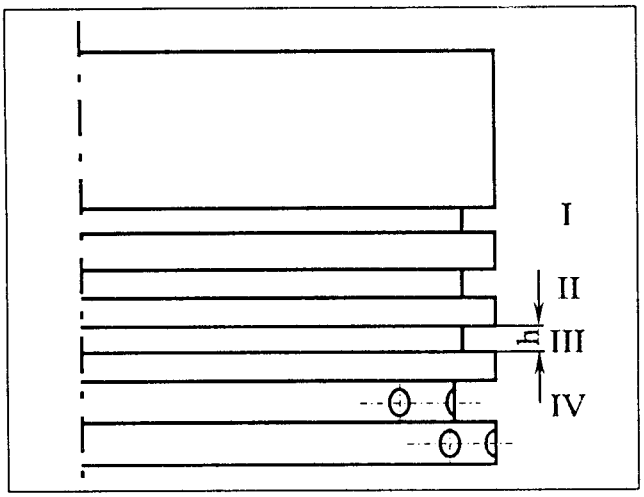
Tabela 2

DM 33 - 350 h (RME)												
	KLIPNI PRSTENOVI											
	I prsten			II prsten			III prsten			IV prsten		
	ΔS	Δh	ΔG	ΔS	Δh	ΔG	ΔS	Δh	ΔG	ΔS	Δh	ΔG
I klip	17.0	10.2	9.4	6.8	3.6	4.8	6.2	3.4	3.3	-	0.4	4.3
II klip	17.6	8.8	12.6	5.4	3.2	4.9	5.6	2.6	3.3	-	3.2	4.0
III klip	21.2	12.0	10.6	6.4	3.8	3.2	5.4	2.2	2.9	-	0.8	3.7
M 33 - 250 h (RME)												
I klip	13.2	6.6	12.3	7.0	2.2	4.0	7.0	4.6	2.6	-	0.6	1.9
II klip	11.8	3.8	5.7	5.6	1.6	2.6	5.6	4.0	2.2	-	3.0	1.9
III klip	15.0	4.0	6.0	8.0	2.6	2.8	7.2	1.0	1.8	-	1.6	1.3

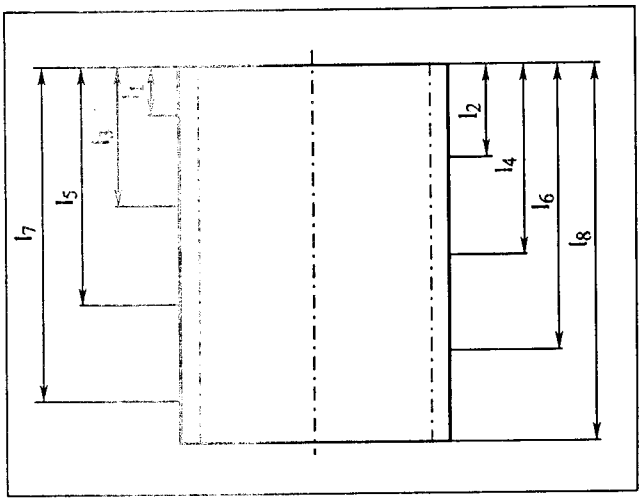
NAPOMENA: Mere ΔS i Δh date su u 10^{-3} mm, a ΔG u 10^{-2} gr.

Tabela 2a

DM 33 - 500 h (D2)												
	KLIPNI PRSTENOVI											
	I prsten			II prsten			III prsten			IV prsten		
	ΔS	Δh	ΔG	ΔS	Δh	ΔG	ΔS	Δh	ΔG	ΔS	Δh	ΔG
I klip	150	38	17	39	4	5.5	15	6	3.8	-	4	1.45
II klip	17	-	16.8	-	-	5.5	10	11	5.9	-	3	1.1
III klip	2	-	15.4	27	9	4.5	32	15	4.6	-	3	1.7
KRITERIJUM 500 h (D2)												
I klip	15	12	-	10	7	-	10	5	-	7	4	-
II klip	15	12	-	10	7	-	10	5	-	7	4	-
III klip	15	12	-	10	7	-	10	5	-	7	4	-



Slika 2. Merne veličine žljebova klipa



Slika 3. Merne veličine košuljice cilindra

U tabeli 4. date su i vrednosti istrošenja jednog od ispitivanih motora (DM33-500h) primenom dizel goriva (D2) i kriterijumi istrošenja za iste uslove ispitivanja.

I na bazi istrošenja košuljice cilindra primenom repičinog metilestra može se konstatovati da su neznatna i nalaze se ispod dozvoljenih istrošenja sa primenom dizel goriva (D2).

3.1.3. Istrošenje košuljice cilindra

Srednje vrednosti istrošenja košuljice cilindara motora DM33 i M33 sa primenom repičinog metilestra prikazane su u tabeli 4, a prema slici 3.

Na osnovu analiza srednjih vrednosti istrošenja klipnog sklopa može se zaključiti da primena repičinog metilestra nema uticaja na intenzivnije habanje komponenata motora, u odnosu na primenu sa dizel gorivom (D2). Međutim, na nekim komponentama motora primećene su izvesne količine naslaga koksa i gareži. To se odnosi na cilindarsku glavu, pečurke i vrat ventila, čeone površine klipova, košuljice cilindara u zoni sagorevanja, unutrašnje površine klipnih prstenova i ojačane delove zaptivke.

Ulje za podmazivanje je bilo dosta zaprljano zbog prisustva čađi, a neki delovi motora u koritu su bili mesti-

Tabela 3.

Klip	Habanje žljeba Δh															
	M33 - 250h (RME)				DM33 - 350h (RME)				DM33 - 500h (D2)				Kriterijum 500h (D2)			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
I klip	0	2.5	0	0	5.0	5.0	2.5	5.0	40	0	0	0	100	45	45	30
II klip	5.0	0	0	0	0	0	0	0	30	-	0	0	100	45	45	30
III klip	0	0	2.5	2.5	0	5.0	2.5	5.0	30	-	0	0	100	45	45	30

Tabela 4.

Merno mesto	M33 - 250h (RME)			DM33 - 350h (RME)			DM33 - 500h (D2)		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
l_1= 19 mm	11	8.0	4.6	7.1	7.0	8.1	4	7	6
l_2= 25 mm	12	10.5	8.0	9.2	9.0	5.0	5	6	6
l_3= 50 mm	11	11.3	3.8	6.3	6.1	5.9	6	7	8
l_4= 76 mm	7	12.1	4.9	4.1	8.8	5.9	4	8	9
l_5=102 mm	8.5	12.3	9.1	4.2	7.5	5.9	6	7	8
l_6=140 mm	11.2	11.0	5.2	5.2	10.0	4.8	8	12	10
l_7=165 mm	13	10.8	3.0	5.2	8.0	4.8	3	6	11
l_8=190 mm	13	11.0	2.8	2.3	5.0	4.8	6	3	4

NAPOMENA: *Vrednosti istrošenja su date u 10^{-3} mm.*

mično prekriveni gustim slojem lepljivog ulja. To je i uzrok pojave riseva i uglačanih površina na kliznim ležajima radilice.

Epruvete su uzimane iz gumenih ploča, a zaptivni prstenovi su ispitivani kao gotovi delovi za ugradnju u pumpe visokog pritiska.

Tabela 5.

Redni broj	Uzorak	Početna tvrdoća	Promena tvrdoće posle uspitivanja (%)		Promena zapremine posle uspitivanja (%)	
		Sh	D2	RME	D2	RME
1.	Freudenberg	75-78	-3.0 -4.6 -3.0	-12.60 -13.73 -13.70	14.5 14.4 14.6	34.60 34.19 35.02
2.	PPT	75-77	-1.0 -2.0 -1.7	-3.02 -3.50 -3.10	4.8 5.1 4.9	9.80 10.60 11.03
3.	Zaptivni prsten ϕ45	74-76	-1.00 -1.01 -1.05	-3.00 -3.04 -2.50	4.10 4.03 3.20	28 27 29
4.	Zaptivni prsten ϕ20	75-77	-0.90 -1.02 -1.00	-2.3 -1.8 -1.6	3.1 3.4 3.9	9.8 9.1 10.5

3.2. Uticaj RME na gumene zaptivke

Da bi se utvrdio uticaj repičinog metilestra na promenu karakteristika zaptivki, izvršena su uporedna ispitivanja nekoliko uzoraka zaptivki u dizel gorivu (D2) i tzv. biodizelu (repičinom metilestru). Uzroci za ispitivanje bile su epruvete i gotovi zaptivni prstenovi pumpe visokog pritiska.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da uzorci od nitril gume imaju mnogo veće promene u RME nego u dizel gorivu D2. Uočavaju se razlike u promenama zapremine i tvrdoće različitih proizvođača, što ukazuje na razlike u sastavu, kao što su punioci i plastifikatori.

Promena zapremine je oko 2.5 puta veća u RME-u nego u dizel gorivu (D2), dok je promena tvrdoće čak i do 4,6 puta veća u RME-u nego u D2 gorivu. To ukazuje na činjenicu da su u RME-u prisutne nezasićene kiseline i drugi elementi koji agresivno utiču na karakteristike gumenih zaptivki.

Uzimajući u obzir da su dozvoljene promene zapremine i tvrdoće 5% prema standardima IMR-a, a i drugim standardima (LUCAS, CAV), onda se može reći da je uticaj repičinog metilestra (biodizela) na zaptivke od nitril gume znatan i da prelazi dozvoljene zahteve.

3.3. Uticaj RME-a na druge komponente motora

S obzirom da je uticaj repičinog metilestra evidentan na gumene zaptivke od nitril gume, u toku su ispitivanja guma drugih karakteristika i sastava, a čiji će rezultati biti objavljeni po završetku ispitivanja.

Za ispitivanje je korišćena nitril guma koja predstavlja kompolimer akrilonintrila i butadiena. Jedan broj uzoraka od nitril gume proizveden je u Freudenbergu (Nemačka), a drugi broj uzoraka je domaće proizvodnje (Prva Petoletka Trstenik).

Pri ispitivanju određivana je promena zapremine (%) i promena tvrdoće (%). Ispitivanje na starenje je izvođeno 240h na 70°C, prema važećem standardu koji se primenjuje pri ispitivanju u dizel gorivu D2. Rezultati ispitivanja su prikazani u tabeli 5.

U toku ispitivanja koja su rađena sa repičinim metilestrom primećena su agresivna svojstva i na drugim komponentama motora. Na primer primećeno je potpuno raslojavanje kaišnika koji je bio u dodiru sa RME-om prilikom vanmotorskih ispitivanja sistema za ubrizgavanje goriva. Pri istom ispitivanju primećena su i agresivna svojstva RME-a na farbu, pri čemu je dolazilo do bubrenja odvajanja farbe u vidu ljuspica. Uticaj biodizela na vrstu farbe biće poznatiji po završetku ispitivanja koja su u toku.

U radnim uslovima motora biodizel raspada na termičke i oksidacione produkte i pod uticajem viskoziteta, taloženja i stvaranja u ulju nerastvorljivih produkata (kokos, čađ i sl.) što može izazvati slabljenje sposobnosti disperzije i vezivanja nečistoća. Međutim, analizom ulja osnovnih parametara, sem navedenih nisu konstatovane bitne promene, za vremenske opsege ispitivanja.

Takođe su primećena i agresivna svojstva biodizela (RME-a), na zaptivkama od drugih materijala (promena zapremine, tvrdoće, obima i sl.), pa je neophodno izvršiti detaljnija ispitivanja na bazi plute, azbesta, gume i dr. Takva ispitivanja su takođe u toku i biće dostupna po njihovom završetku.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu svih dosadašnjih ispitivanja dizel motora sa primenom goriva od repičinog metilestra, a sa aspekta triboloških i agresivnih svojstava na pojedine komponente motora može se konstatovati sledeće.

Istrošenja klipnog sklopa (klipnih prstenova, žljebova u klipu i cilindarskih košuljica) nisu intenzivnija u odnosu na primenu dizel goriva D2. Zaptivke od nitril gume nisu otporne na biodizel, jer trpe veliku promenu zapremine i tvrdoće, što nije uobičajeno sa primenom goriva D2. I drugi gumeni elementi imaju vizuelne promene u dodiru sa biodizelom a koje nisu uobičajene sa primenom goriva D2, npr. gumeni kaišnici, gumena creva i sl.

Uticaj na farbe je takođe negativan, jer izaziva bubrenje i ljuštenje farbe u vidu ljuspica.

U tom kontekstu potrebno je nastaviti istraživanja o uticaju biodizela na agresivnost drugih tipova gumenih i drugih zaptivki kao i drugih elemenata.

Takođe je potrebno nastaviti istraživanja o uticaju biodizela na farbu, ulje i dr.

LITERATURA

[1.] *P. Petrović, Lj. Marković, B. Veselinović*, **Primena repičinog metilestra (RME) kao goriva za dizel motore**, JUGOMA 94, Novi Sad

[2.] *T. Murayoma*, **Evaluating Vegetable Oils as a Diesel Fuel**, Inform, vol. 5, No 10; october 1994.

[3.] *P. Petrović, Lj. Marković, S. Janković*, **Istraživanje mogućnosti primene repičinog metilestra (RME) kao alternativnog goriva dizel motora**, Bomase, jun 1995, Beograd

[4.] *B. Bertrand*, **Psa Peugeot Citroen "Automobiles, Energy and environment after 2005"**, FISITA '94 oktobar '94, Kina, Vol. 2, str. 1-8

[5.] *Lj. Marković, P. Petrović, S. Janković*, **Energija iz biomase kao alternativno gorivo dizel motora**, Biomase, jun 1995, Beograd

[6.] *P. Petrović, R. Gligorijević, Lj. Marković, S. Janković*, **Perspektive i neka iskustva primene obnovljivih alternativnih goriva dizel motora**, YUNG, oktobar 1995, Vrnjačka Banja

[7.] Standardi - DIN 73379, LUCAS 6-18-88-89 CAV RS 2D, 12.

[8.] Interna dokumentacija IMR-a.

Aggressiveness of The Methyl Esters And Their Influence on The Diesel Engine Wear

Development and production of the alternative fuels for diesel engines created the necessity for complex investigations of influence of their application of the diesel engine assemblies. In the IMR Institute were performed the engine tests and out - of - the - engine tests, as well as the detailed analyses of other influential factors of fuel that stem from its physical - chemical characteristics.

By the comparative analysis of the esters application with respect to the application of the mineral fuels, the problems were identified that arose due to application of the methyl esters.

In this paper is presented one part of investigations that is related to the influence of tribological characteristics and aggressive properties of the methyl esters for the diesel engine assemblies.

Key words: methyl ester, alternative fuel, diesel engine, oil beet, bio diesel.

Агрессивность метилэстра и его влияние на изнашивание дизельных двигателей

Развитие и производство альтернативного топлива для дизельных двигательей потребовали всеобъемлющих исследований его влияния на узлы и детали дизелей. В исследовательском Институте Завода двигателей Раковица проведенны испытания на двигателеях и вне них агрессивности метилэстра, при подробном анализе прочих воздейествующих факторов топлива, происходящих из его физико-химических свойств.

Сравнительным анализом использования метилэстра и минералных топлив в дизелях, установлено, что использование метилэстра оказывает отрицательное воздействие. В настоящей работе изложена часть исследовательской работы, касающаяся испытания воздействия триболоґических характеристик и агресивных свойств метилэстра на узлы дизельных двигателей.

UDK 621.9.015.004.6

Đ. ERCEGOVIĆ, M. VELJIĆ

Značaj i mogućnosti određivanja koeficijenta trenja zemljišta o radne površine poljoprivrednih mašina

Pri obavljanju radnih operacija u poljoprivrednoj proizvodnji pojavljuje se trenje koje ima veliki uticaj na izvođenje operacija. Posledice trenja su štetne, jer povećavaju utrošak energije, odnosno troškove eksploatacije i održavanja.

U okviru ovog rada prikazano je određivanje koeficijenta trenja, utvrđena zavisnost njegove promene od vlažnosti zemljišta i analizirana mogućnost smanjenja koeficijenta trenja.

Istraživanja su pokazala da je moguće smanjiti veličinu koeficijenta trenja putem nanošenja na radne površine poljoprivrednih mašina premaza i nanošenjem površinskih prevlaka.

Ključne reči: trenje, energija, vlažnost, zemljište, premaz, prevlaka

1. UVOD

Trenje se pojavljuje u svim operacijama poljoprivredne proizvodnje i često predstavlja značajnu karakteristiku procesa. Trenje je posebno izraženo u operacijama obrade zemljišta, kod mašina sa pasivnim radnim organima, jer se veliki deo uložene energije troši na savlađivanje trenja, a istrošenje, koje prati pojavu trenja, toliko promeni geometrijske parametre radnih organa da je iste nakon kratkog perioda rada neophodno zameniti. Gubici energije na trenje zemljišta o radne organe i istrošenje povećava troškove eksploatacije i održavanja poljoprivrednih mašina.

2. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA TRENJA

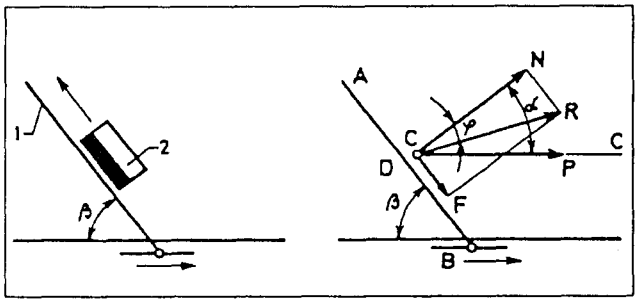
Mnogobrojna istraživanja posvećena su proučavanju trenja, određivanju koeficijenta trenja i sile trenja. U literaturi se mogu naći različiti rezultati istraživanja fenomena trenja i određivanja koeficijenta trenja i različiti uređaji za određivanje koeficijenta trenja.

U okviru ovih istraživanja korišćen je uređaj za određivanje koeficijenta trenja po sistemu V. A. Želigovskog, slika 1.

Dr Đuro Ercegović, vanr. prof.,
Poljoprivredni fakultet, Beograd
Dr Milan Veljić, vanr. prof.,
Mašinski fakultet, Beograd

Uređaj se sastoji od lenjira (1), za koji je pričvršćena epruveta od materijala koji se ispituje i klizača (2) u kome se nalazi uzorak zemljišta. Lenjir (1) se fiksira pomoću zavrtnja za papuču, po predhodno izabranom uglu β. Klizač (2) poseduje sistem za zapisivanje putanje kretanja. Ugao β bira se tako da se pri kretanju lenjira ostvaruje klizanje jednog tela po drugom. Pod dejstvom aktivne sile, koja deluje na telo sa strane lenjira, telo se prinudno pomera po lenjiru. Da bi došlo do kretanja tela po lenjiru mora biti ispunjen uslov ($\beta<\pi/2$, odnosno $\alpha>\varphi$. Ukoliko je $\alpha<\varphi$ neće doći do pomeranja tela po lenjiru.

Usled kretanja klizača (2) u kome se nalazi uzorak zemljišta, po epruveti, koja je pričvršćena za lenjir (1), pojavljuje se trenje klizanja. Klizač, pri kretanju niz lenjir, zapisuje pravac rezultantne sile R. Ugao između rezultante R i normalne komponente na lenjir N, predstavlja ugao trenja, odnosno $\mu=\text{tg}\ \varphi=F/N$.



Slika 1. Šema uređaja za određivanje koeficijenta trenja

Ovaj metod određivanja koeficijenta trenja daje zadovoljavajuće rezultate, jer se podaci - rezultati grafički zapisuju na papiru i pogodni su za obradu i proveru.

Rezultati istraživanja zavisnosti koeficijenta trenja od pritiska zemljišta na radne površine i brzine klizanja ukazuju na različite, često protivrečne zaključke. Tako M. G. Prigažaja i I. Z. Bagirov dolaze do zaključka da povećanje brzine izaziva neznatno povećanje koeficijenta trenja. V.I. Vinogradov zaključuje da povećanje brzine klizanja dovodi do smanjenja koeficijenta trenja, a R. J. Primov ne nalazi promenu koeficijenta trenja sa povećanjem brzine klizanja.

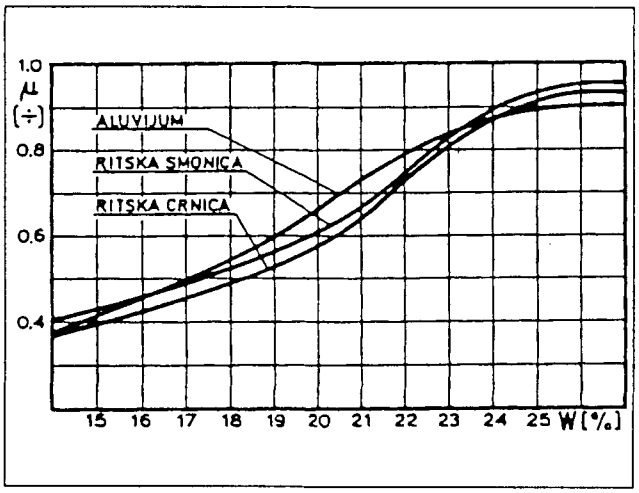
Povećanje specifičnog pritiska na površinu kontakta metala sa zemljištem, po mišljenju V.A. Ščučkina i A.T. Jakobčenka, izaziva smanjenje koeficijenta trenja, jer kao rezultat sabijanja zemljišta na površini trenja se pojavljuje slobodna voda koja ispoljava podmazujuće dejstvo.

Uticaj hrapavosti metalne površine na veličinu koeficijenta trenja zemljišta po metalnoj površini ispitivao je N.V. Ščučkin i pri tome dobio neznatno povećanje koeficijenta trenja pri klizanju zemljišta po čeličnoj površini sa visokim kvalitetom obrade u poređenju sa površinom koja je obrađena grubim brušenjem.

3. SOPSTVENA ISTRAŽIVANJA

U okviru ovog rada prikazana su sopstvena istraživanja odredivanja koeficijenta trenja materijala Č.4320, od kojeg se izrađuju radni organi poljoprivrednih mašina, za različite vrste zemljišta: ritska crnica, ritska smonica i aluvijum pri promenljivoj vlažnosti. Promena koeficijenta trenja m u zavisnosti od vlažnosti W prikazana je dijagramom na slici 2.

Sa dijagrama se zaključuje da se koeficijent trenja znatno povećava sa porastom vlažnosti zemljišta, naročito u



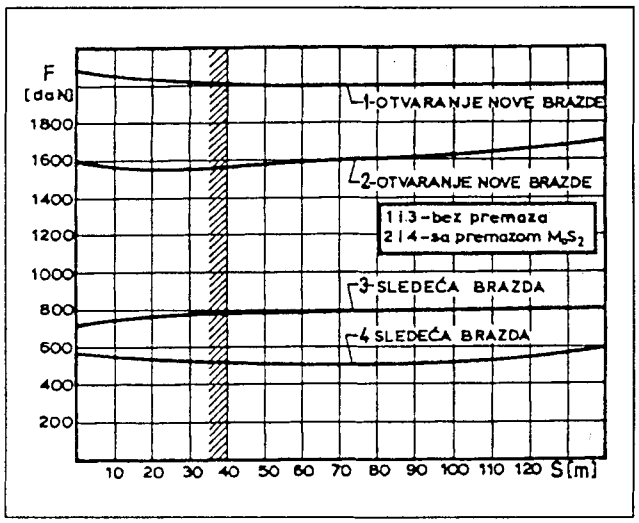
Slika 2. Promena koeficijenta trenja u zavisnosti od vlažnosti za različite vrste zemljišta

predelu vlažnosti od 16 do 24% i da je karakter promene sličan za sve tri ispitivane vrste zemljišta.

Nagli porast koeficijenta trenja (za 95 do 100%) u oblasti vlažnosti zemljišta od 16 do 25% ima za posledicu povećanje vučne sile i povećano istrošenje površina, što dovodi do povećanja utrošene energije i do promene geometrijskih parametara radnih organa (oštrica raonika, diskova, motičica, itd.).

Mnogobrojna istraživanja su vršena sa ciljem smanjenja koeficijenta trenja između zemljišta i površina radnih organa mašina za obradu zemljišta. U tim istraživanjima korišćene su plužne daske izrađene u obliku traka (radi smanjenja površine) postavljene u pravcu kretanja plastice, vibrirajuća plužna tela, elektro podmazivanje, nanošenje vode i vazduha pod pritiskom na radne površine, plužne daske od plastike, radni organi sa prinudnim pogonom (vibrirajući radni organi), itd.

Sopstvena istraživanja vršena su u cilju smanjenja koeficijenta trenja u kontaktu radne površine pluga i zemljišta putem nanošenja na radnu površinu sloja molibden disulfida, MoS2, u obliku paste i praha. Rezultati dobijeni pri obradi suvog peskovitog zemljišta, pri dubini obrade oko 0.3 m i širini zahvata dvobrazdnog pluga od 0.7 m, prikazani su dijagramom na slici 3.



Slika 3. Zavisnost vučne sile poluga od stanja radne površine

Dobijeni rezultati pokazuju da se vučni otpor pri otvaranju nove brazde, posle nanošenja na radnu površinu sloja MoS_2, smanjio za oko 20%, a pri sledećoj brazdi za oko 30 %. Sa dijagrama se može zaključiti da ovakvo stanje odgovara kratkom pređenom putu, odnosno smanjenje vučne sile odgovara početnom periodu rada, a da se pri dužem radu (dužem pređenom putu). vučni otpor povećava, već posle pređenih oko 100 m puta. Ovo je posledica povećanja koeficijenta trenja, jer se naneti sloj - premaz - MoS_2 skida, usled trenja zemljišta o radnu površinu pluga.

Glavni nedostatak ovog postupka smanjenja koeficijenta trenja, je u tome što se naneti slojevi brzo skidaju, pa već nakon pređenih 60 do 80 m vučna sila počinje da raste.

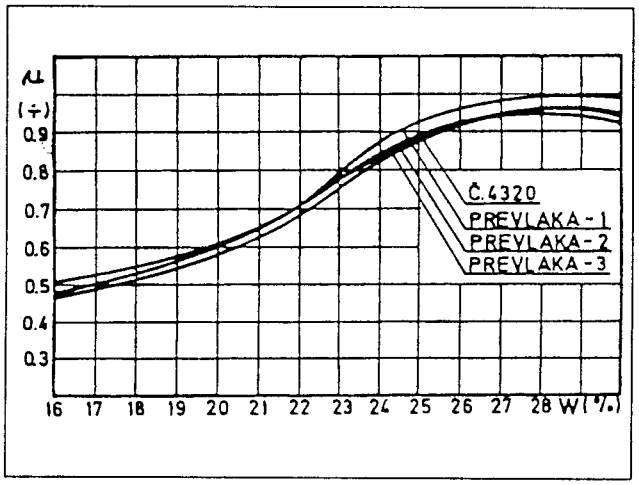
Sopstvena istraživanja vršena su i nanošenjem na radnu površinu pluga različitih površinskih prevlaka i obrađivane su njihove karakteristike, odnosno koeficijent trenja. Koeficijent trenja nanetih prevlaka je upoređivan sa koeficijentom trenja čelika Č.4320. Ispitivane su tri vrste prevlaka:

- Prevlaka 1: predstavlja legirani hrom-nikl čelik i prema preporuci proizvođača poseduje dobre osobine otpornosti na koroziju i istrošenje,
- Prevlaka 2: predstavlja nikl-molibdensku kompoziciju (u obliku praha). Prema podacima proizvođača poseduje mali koeficijent trenja i
- Prevlaka 3: predstavlja hrom-nikl kompoziciju (u obliku praha). Prema preporuci proizvodača ostvaruje se tvrda prevlaka sa malim koeficijentom trenja i povećanom otpornošću na istrošenje.

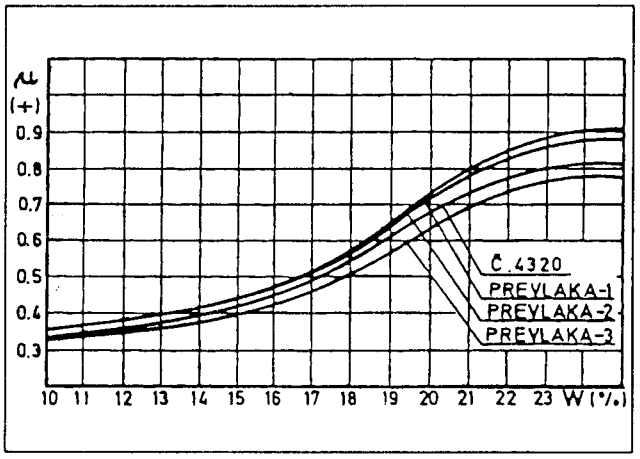
Ispitivanja su sprovedena na dva tipa zemljišta: ritskoj smonici i aluvijumu. Na dijagramu, slika 4, prikazana je promena koeficijenta trenja za ispitivano zemljište ritsku smonicu.

Sa dijagrama se može zaključiti da je najveći koeficijent trenja dobijen kod prevlake 1, posebno u oblasti povećane vlažnosti zemljišta. Najmanji koeficijent trenja, u oblasti manjih vrednosti vlažnosti, dobijen je kod prevlake 3, a u oblasti povećanih vlažnosti zemljišta, kod čelika Č.4320.

Na dijagramu, slika 5, prikazana je promena koeficijenta trenja za ispitivano zemljište aluvijum. Sa dijagrama se može zaključiti da najveći koeficijent trenja poseduje prevlaka 2, a izrazito najmanji koeficijent trenja poseduje prevlaka 3 u celom ispitivanom području promene vlažnosti zemljišta.



Slika 4. Promena koeficijenta trenja u zavisnosti od vlažnosti za ritsku smonicu



Slika 5. Promena koeficijenta trenja u zavisnosti od vlažnosti za zemljište aluvijum

Na osnovu prikazanih istraživanja, određivanja koeficijenta trenja nanetih prevlaka i upoređujući sa čelikom Č.4320, može se zaključiti da određene vrste prevlaka daju manji koeficijent trenja od 15 do 20 %, i da prevlaka 3 pri tome daje najbolje rezultate.

4. ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata istraživanja prikazanih u ovom radu može se zaključiti sledeće:

1. Da je istraživanje koeficijenta trenja o površine radnih organa mašina za obradu zemljišta veoma značajno pitanje, s obzirom da trenje direktno utiče na veličinu vučne sile, na istrošenje i na utrošak energije.
2. Da je nanošenjem premaza MoS_2 na radnu površinu plužne daske dobijeno znatno smanjenje vučne sile. Činjenica da se naneti sloj MoS_2 brzo skida sa radne površine ukazuje da je neophodno raditi na osvajanju tehnologije koja će obezbediti duže zadržavanje nanetog sloja ili postupaka koji će obezbediti da se u površinskom sloju nađe materija koja će smanjiti koeficijent trenja.
3. Istraživanja nanošenja površinskih prevlaka sa smanjenim koeficijentom trenja i visoke tvrdoće, daju dobre rezultate, posebno ako se pri tome posmatraju posledice trenja (istrošenje).
4. Poznavanje zavisnosti promene koeficijenta trenja od vlažnosti zemljišta, za materijale radnih organa mašina za obradu zemljišta, je veoma značajno, jer ova istraživanja ukazuju da je obradu zemljišta potrebno i opravdano obavljati u granicama vlažnosti kada je koeficijent trenja najmanji (ukoliko to dozvoljavaju agrotehnički rokovi izvršavanja operacija obrade zemljišta).
5. Istraživanja pokazuju da je izborom materijala sa smanjenim koeficijentom trenja, nanošenjem premaza ili prevlaka, moguće u velikoj meri smanjiti vučnu silu, odnosno uloženu energiju, čime se ostvaruju uštede u proizvodnji, eksploataciji i održavanju.

LITERATURA

[1.] *Ercegović, Đ.*, **Nove koncepcije mehanizacije za obradu zemljišta, setvu, unošenje đubriva i pesticida**, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd,1987.

[2.] *Krageljski, I.V.*, **Trenje i istrošenje**, Moskva, 1968.

[3.] *Novaković, V.*, **Uticaj trenja i optimizacija radnih organa i parametara poljoprivrednih mašina**, Tehnika 1/1978.,1-7.

[4.] *Novaković, V. i Ercegović, Đ.*, **Istraživanje koeficijenta trenja i istrošenja za različite vrste površinskih prevlaka na radnim organima poljoprivrednih mašina**, VI Internacionalni simpozijum "Poljoprivredno mašinstvo i nauka , Požarevac,1988, 246-260.

Importance And Possibilities For Determination of The Friction Coefficient of The Soil Against The Working Surfaces of The Agricultural Machines.

Abstract. In performing the working operations in agricultural production the friction arises which has the great influence on the realization of operations. Consequences of friction are harmful since they cause the energy consumption increase, namely the increase of the exploitation and maintenance costs.

In this paper is presented the determination of the friction coefficient, established was its dependence on the soil moisture, and analyzed is the possibility for the friction coefficient decrease.

Investigations have shown that it is possible to lower the friction coefficient value by application of the layers and the surface coatings to the working surfaces of the agricultural machines.

Key words: friction, energy, soil, layer, coating.

Значение и возможности определения коэффициента трения грунта с рабочими поверхностями сельскохозяйственных машин

При земледельческих работах возникает трение, оказывающее большое влияние на проведение работы. Трение повышает расход энергии, а тем и расходы эксплуатации и обслуживания.

В настоящей работе показан способ определения коэффициента трения, установленна зависимость его изменения от влажности грунта, и проведён анализ виозможности его понижения.

Исследования показывают, что понижение коэффициента треия возможно нанесением плёнок и покрытий на рабочие поверхности сельскохозяйственных машин.

UDK 621.192.004.019

M. OGNJANOVIĆ, V. LAĆARAC

Pobuda buke klizanjem mašinskih delova

Klizanjem se elastično deformišu površinski slojevi mašinskih delova, sudaraju se i razaraju neravnine i sl. Sve to dovodi do akumulisanja potencijalne energije koja dovodi do vibracija u unutrašnjosti mašinskih delova i njihovih površina. U neposrednom zahvatu neravnina na površinskim slojevima, naročito sudaranjem neravnina, generišu se primarni zvučni talasi. Površine delova generišu sekundarne zvučne talase. U radu je obrađen model akumulisanja energije u vidu virtualnog deformacionog rada, zatim model sprezanja delova posredstvom neravnina na površinama i emisija primarnih zvučnih talasa, modalno oscilovanje u unutrašnjosti mašinskih delova i model emisije sekundarnih zvučnih talasa preko površina delova koje trepere kao membrane.

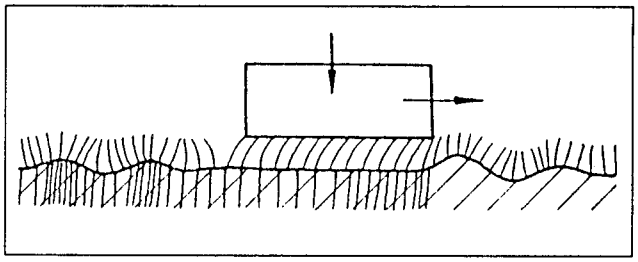
Ključne reči: *buka, klizanje, modalna analiza, zvučni talasi*

1. UVOD

Klizanje je proces koji pored ostalih nepovoljnih efekata generiše akustički šum, škripu ili doprinosi apsorpciji poremećajne energije koja se preko površina mašinskih delova emituje u okolini kao sekundarni zvuk. Po definiciji svaki neprijatni zvuk predstavlja buku. S tim u vezi, i ako nivo zvuka usled klizanja ne mora uvek biti visok, predstavlja energiju koja zagađuje životnu sredinu.

Sa aspekta ostvarivanja zvučnih efekata, klizanja mašinskih delova mogu se razvrstati u sledeće kategorije. Prvu čine oni sklopovi u kojima se funkcija ostvaruje na principu klizanja, kao što su klizni ležaji, klizne vođice, pužni parovi, navojni parovi i dr. Primenjena konstrukciona rešenja, materijali, stanje površina, podmazivanje i dr., obično su takvi da su akustički efekti klizanja maksimalno smanjeni. Drugu kategoriju kliznih spojeva čine oni spojevi u kojima je klizanje prateća pojava, kao što su zglobne veze, klizanja u spregama zupčanika, klizanje u kotrljajnim ležajima i sl. Podmazivanjem se takođe u određenoj meri smanjuju efekti klizanja. Treću grupu čine mikro-klizanja u čvrstim navojnim i u presovanim spojevima, uklještenjima itd. Trenje u ovim spojevima omogućuje ostvarivanje funkcije i neophodno je da bude što većeg intenziteta. Kretanja pri tom, makar i mikrokretanja nisu poželjna. Četvrtu kategoriju klizanja u mašinskim sistemima čine ona klizanja koja omogućuju prenos snage, kao što je kod frikcionih spojnica, kočnica, frikcionih i kaišnih parova i slično. Podmazivanje ovih spojeva nije poželjno, a kada se i vrši to nije u funkciji smanjivanja sile trenja.

Radom sile trenja mehanička energija se prevodi u toplotu. Pri tome se ostvaruju elastične deformacije površinskog sloja delova u dodiru i elastične deformacije neravnina (sl. 1). Virtualni rad pri ovim deformacijama predstavlja apsorbovanu mehaničku energiju. Posle oslobađanja ovih deformacija nastupa oscilovanje, tj. talasno kretanje u elastičnom materijalu mašinskog dela. Pri kretanju jednog dela u odnosu na drugi, ispred se površinski sloj sabija, a iza zateže. Nakon proklizavanja, delovi površinskog sloja i neravnine se naglo oslobađaju deformacija. Oslobođena energija dovodi do talasnog kretanja - oscilovanja.



Slika 1. Treperenje (oscilovanje) neravnina i površinskog sloja pri proklizavaju

Neravnine i površinski sloj su u neposrednom dodiru sa vazduhom na koji prenose talasno kretanje. Ovi zvučni talasi predstavljaju primarni zvuk. Talasno kretanje prenosi se sa površinskog sloja i na unutrašnjost mašinskog dela. Zajedno sa sopstvenim oscilacijama u unutrašnjosti mašinskog dela (modalno oscilovanje), pokreću i ostale površine da trepere kao membrane. Ove površine emituju u okolinu sekundarne zvučne talase.

Prof. dr Milosav Ognjanović,
mr Vesna Laćarac,
Mašinski fakultet Beograd

2. ENERGIJA APSORBOVANA KLIZANJEM

Apsorpcija energije se ostvaruje posredstvom elastičnih deformacija neravnina i površinskog sloja. Deformacioni rad po definiciji je jednak poluproizvodu sile i deformacije. Pri klizanju je jedan deo elastične deformacije stalan a drugi promenljiv. Promenljivi deo definiše virtualni rad

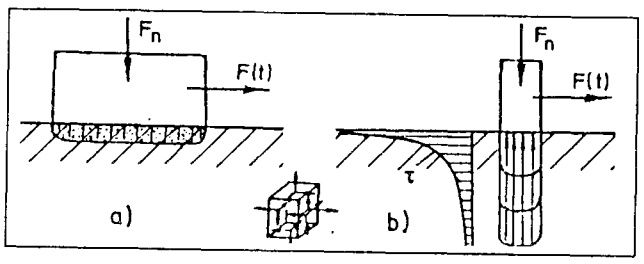
$$\delta W = q \cdot c \cdot \delta \cdot q \qquad (1)$$

gde je: q - generalisana koordinata elastične deformacije,
c - krutost neravnine ili površinskog sloja zavisno od toga koji se virtualni rad određuje.

Krutost površinskog sloja može se izraziti preko napona u ovom sloju tj. $c_p = \sigma \cdot \delta q$. Napon $\sigma = F/A$, gde je F - sila u pravcu klizanja, $A = b \cdot \xi$ - površina poprečnog preseka površinskog sloja, b - širina površinskog sloja u dodiru, a ξ - je debljina sloja odnosno dubina do koje doseže dejstvo normalne sile (sl. 2). Ako je dodirna površina veća, pri istoj sili F_n, dubina ξ je manja i obrnuto. To znači da krutost površinskog sloja c_p ne zavisi od veličine normalne sile F_n. Od ove sile zavisi zapremina zahvaćena elastičnim deformacijama. Elementarni delić mase u ovoj zapremini izložen je naponima u pravcu sile F_n, u pravcu sile F i u svim drugim pravcima. To je tenzor napona koji srazmerno deformacijama u odgovarajućim pravcima apsorbuje deformacioni rad, odnosno potencijalnu energiju

$$E_W = W = \int_V \sigma \cdot dV \qquad (2)$$

Većoj sili F_n odgovara veća zapremina V zahvaćena elatičnim deformacijama. Od veličine dodirne površine zavisi veličina napona u ovoj zapremini i dubina do koje se oseća uticaj napona. Ova dva parametra se međusobno kompenzuju te veličina apsorbovane energije E_w kao ni veličina sile trenja ne zavise od veličine dodirne površine.



Slika 2. Uticaj veličine prostora zahvaćenog elastičnim deformacijama na krutost površinskog sloja

Energija akumulisana deformisanjem površinskog sloja je samo jedan vid energije koji se radom sile trenja pretvori u toplotu, energiju vibracija i buke. Energija koju apsorbuju elastične deformacije, troši se (deli se) na nekoliko celina

$$E_W = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \qquad (3)$$

gde su: E_1 - energija vibracija neravnina,
E_2 - energija vibracija površinskog sloja,
E_3 - energija vibracija u unutrašnjosti mašinskog dela,
E_4 - toplota oslobođena vibracijama neravnina, površinskog sloja i vibracijama unutar mašinskog dela.

Na primarne zvučne talase prvenstveno se troši energija E_1 i E_2. Sekundarni zvučni talasi su posledica rasipanja energije E_3 i energije sopstvenih (modalnih) oscilacija.

3. MODELIRANJE VIBRACIJA I PRIMARNIH ZVUČNIH TALASA

Zahvat mašinskih delova u dodiru, ostvaruje se preko neravnina (sl. 3a) koje po obliku, veličini i rasporedu predstavljaju stohastičko stanje koje se ne može opisati egzaktnim matematičkim relacijama. Za tu svrhu mogu se uvesti uprošćeni modeli prikazani na slikama 3b, c i d. Delovi u dodiru su mase m_1 i m_2 spojene sa drugim delovima u mašinskom sistemu pri čemu su krutosti ovih veza c_{k1} i c_{k2}. Međusobna veza delova ostvaruje se preko neravnina koje se mogu predstaviti konzolama (sl. 3c) različitih veličina, krutosti i koje su na različitim rastojanjima. Na slici 3d prikazana je sprega masa m_1 i m_2 posredstvom neravnina krutosti c_{ij} i prigušenja b_{ij}. Indeksom i označene su površine 1 ($i=1$) i 2 ($i=2$), a indeksom j redni broj spregnutih neravnina. Sila u ovoj sprezi je:

$$F(t) = c_{p1} \cdot \Delta_1 + c_{p2} + \sum_i \sum_j F_{ij}(t) \cdot \varepsilon_{ij}(t) \qquad (4)$$

gde su c_{p1} i c_{p2} krutosti površinskih slojeva delova 1 i 2, a Δ_1 i Δ_2 - deformacije ovih slojeva pri kojima neravnine izlaze iz zahvata. Veličina $\varepsilon_{ij}(t)=1$ ako su neravnine dovoljne veličine da se mogu međusobno dodirivati, a $\varepsilon_{ij}(t)=0$ - ako se ne mogu dodirivati. Sila na dodiru dveju neravnina je:

$$F_{ij} = c_{ij} \cdot \Delta_{ij}(t) + b_{ij} \cdot v_k(t) + \Phi_{ij}(t) \qquad (5)$$

gde su: c_{ij} - krutost neravnina,
b_{ij} - prigušenje u sprezi neravnina,
$\Delta_{ij}(t)$ - deformacija neravnina,
$v_k(t) = \dot{x}_2(t) - \dot{x}_1(t)$ - brzina klizanja,
$\Phi_{ij}(t)$ - sila sudara pri sprezanju neravnina.

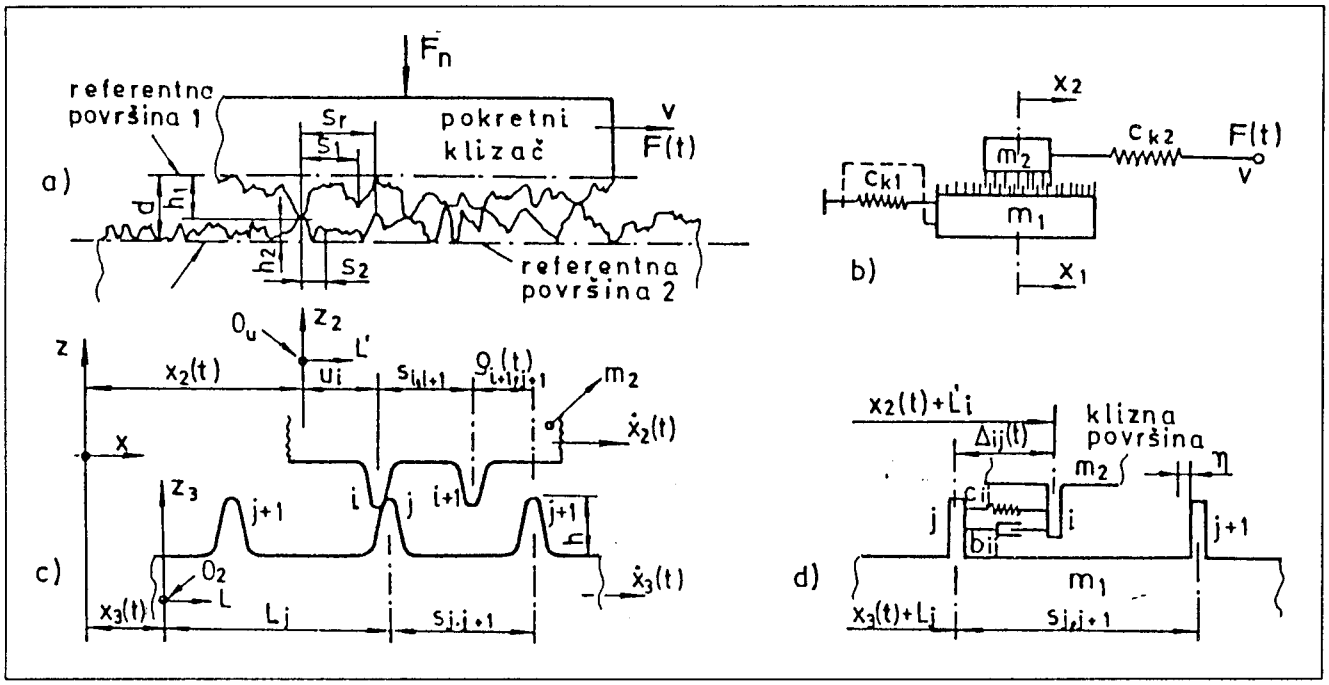
Mase m_1 i m_2 mogu se razdvojiti tako što će se dejstvo one druge zameniti dejstvom sile $F(t)$. Na masu m_2 deluje još i sila koja savlada otpor $F(t)$ tj. vrši klizanje:

$$F_k(t) = c_{k2} \cdot \left[v \cdot t - x_2(t) \right] \qquad (6)$$

gde je v - brzina kretanja mase m_2, a $x_2(t)$ - pomeranje mase m_2. Dinamička ravnoteža masa m_1 i m_2 može se predstaviti jednačinama:

$$m_1 \ddot{x}_1 = F(t) - c_{k1} x_1 \qquad (7)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = F_k(t) - F(t) \qquad (8)$$

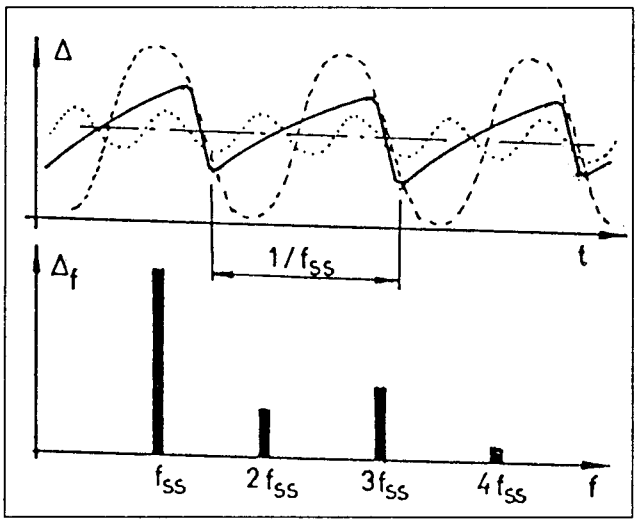


Slika 3. Modeli sprezanja mašinskih delova preko neravnina pri klizanju

Uklanjanjem prinudnih sila dobijaju se jednačine slobodnog neprigušenog oscilovanja masa i njihove sopstvene učestanosti:

$$f_{m1} = \frac{1}{2\cdot\pi}\cdot\left(\frac{C_{k1}}{m_1}\right)^{0.5} ; \quad f_{m2} = \frac{1}{2\cdot\pi}\cdot\left(\frac{C_{k2}}{m_2}\right)^{0.5} \qquad (9)$$

Stip-slip proces nastaje smicanjem (čupanjem) neravnina. Kada se neravnine međusobno duboko spregnu, pri povećanju sila $F(t)$ i $F_k(t)$, povećava se deformacija neravnina, površinskih slojeva i veza masa m_1 i m_2 sa drugim delovima, ali međusobnog kretanja nema. Sile i deformacije se povećavaju sve dotle dok naponi u korenu neravnina ne dostignu kritičnu vrednost $[\tau_{ij}]$. U tom trenutku nastupa naglo smicanje neravnina. Sile i deformacije se naglo smanjuju, a brzina kretanja se naglo



Slika 4. Funkcija promene deformacije pri stik-slip procesu

povećava. Proces se uzastopno periodično ponavlja u vidu *"poskakivanja"* jednog dela u odnosu na drugi. Deformacija površinskog sloja u trenutku smicanja neravnina $[\Delta]$ i učestanosti stik-slip procesa f_{ss} je:

$$[\Delta] = \frac{c_p}{[\tau_{ij}]} ; \; f_{ss} = \frac{v_k}{[\Delta]} \qquad (10)$$

Na slici 4 prikazana je vremenska funkcija promene deformacije pri jako izraženom stik-slip procesu. Ova funkcija se može razložiti u Furijeov red elementarnih sinusnih funkcija različitih frekvencija i različitih faznih pomeraja. Na slici 4b prikazan je spektar formiran od Furijeovog reda elementarnih funkcija.

Učestanost sudara neravnina f_c proporcionalna je gustini neravnina i brzini klizanja površina u dodiru. Ako je rastojanje između neravnina s, pri brzini klizanja v_k učestanost sudaranja neravnina je:

$$f_c = \frac{v_k}{s} \qquad (11)$$

Proces klizanja je stohastičan. Neravnine su neravnomerno raspoređene, nejednake su veličine i krutosti. Učestanost sudaranja je promenljiva, a takođe se menja i sila sudara neravnina Φ_{ij}. I funkcije sudara mogu se razložiti u spektar elementarnih funkcija. To doprinosi povećanju gustine frekvencijskog spektra.

Na slici 5 prikazani su frekvencijski spektri vibracija i buke dobijeni merenjem pri klizanju mašinskih delova mase m_1 i m_2. Usled velikog broja uticaja, odnosno usled razlaganja više vremenskih funkcija, frekvencijski spektri su veoma složeni. Ova složenost se ogleda u kontinual-

nosti spektra, tj. u činjenici da su ujednačeno zastupljene amplitude u celom području frekvencija od *20 Hz* do *20 kHz*.

U spektru vibracija su istaknute amplitude za sopstvenu učestanost fm, za učestanost smicanja neravnina fss i za njene više harmonike kao i za učestanost sudara neravnina f_c. U spektru vibracija, amplitude za učestanost f_c su relativno niske. Sudar neravnina ne utiče značajnije na vibracije masa m_1 i m_2. U spektru akustičkog pritiska (sl. 5b) efekat sudara neravnina je izrazit. Može se zaključiti da su primarni zvučni talasi prvenstveno posledica sudara i treperenja (oscilovanja) neravnina i površinskog sloja.

Spektar na slici 5b odnosi se na zvuk koji je meren u blizini klizne površine. Veličina akustičkog pritiska zavisi od rastojanja mikrofona od površine *y*. Stoga je na ordinati dijagrama data relativna vrednost akustičkog pritiska *p/yp* čije dimenzije odgovaraju ubrzanju, tj. mogu se upoređivati sa vibracijama na slici 5a.

4. MODELIRANJE SEKUNDARNIH ZVUČNIH TALASA

Posredstvom elastičnih deformacija, prvenstveno površinskog sloja, mašinski deo apsorbuje energiju koja se unutar zapremine širi u vidu talasa. Lokalni pritisak u deliću mase mašinskog dela može se napisati u obliku:

$$p(x,y,z)\cdot e^{j\omega t} = \sum_{m,n=0}^{\infty} P_{mn}\cdot(x,y)\cdot[A_{mn}\cdot e^{j(\omega t - t_{mn}z)} + B_{mn}\cdot e^{j(\omega t - t_{mn}z)}] \quad (12)$$

Ako se ova funkcija primeni na jednostavni i pravilni oblik kao što je štap, oscilovanje se vrši između graničnih površina na rastojanju L_x, L_y i L_z. Ove granične površine reflektuju talase (sl. 6) tj. zadovoljavaju granični uslov u sva tri pravca, na primer u pravcu *x*:

$$\frac{\delta p_{mn}(x=0)}{\delta x} = 0; \quad \frac{\delta p_{mn}(x=L_x)}{\delta x} = 0 \quad (13)$$

Ovo je jedna modalna zona, a može ih biti *qrs*,

gde je: $q=1, 2,...$ - broj pregrada u pravcu ose *x*,
$r = 1, 2,...$ - broj pregrada u pravcu ose *y* i
$s = 1, 2,...$ - broj ovih pregrada u pravcu ose *z*.

U jednačini (12) talasni broj $k=\omega/c_w$ ($\omega=2\cdot\pi\cdot f$- kružna učestanost, c_w - brzina prostiranja talasa) je:

$$k_{zmn}^2 = k^2 - k_{mn}^2; \quad k_{mn}^2 = \left[\left(\frac{m\cdot\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n\cdot\pi}{L_y}\right)^2\right] \quad (14)$$

gde su *m* i *n* tačke u ravni preseka *x*, *y*. Funkcija pritiska u ovim ravnima je:

$$p_{mn}(x,y) = \theta_{mn}\cdot\cos\frac{m\cdot\pi\cdot x}{L_x}\cdot\cos\frac{n\cdot\pi\cdot x}{L_y} \quad (15)$$

gde je:

$$\theta_{mn} = (2-\delta_{0m})^{0.5}\cdot(2-\delta_{0n})^{0.5};$$
$$\delta_{0m}\delta_{0m} = \begin{Bmatrix} 1 & m,n=0 \\ 0 & m,n\neq 0 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

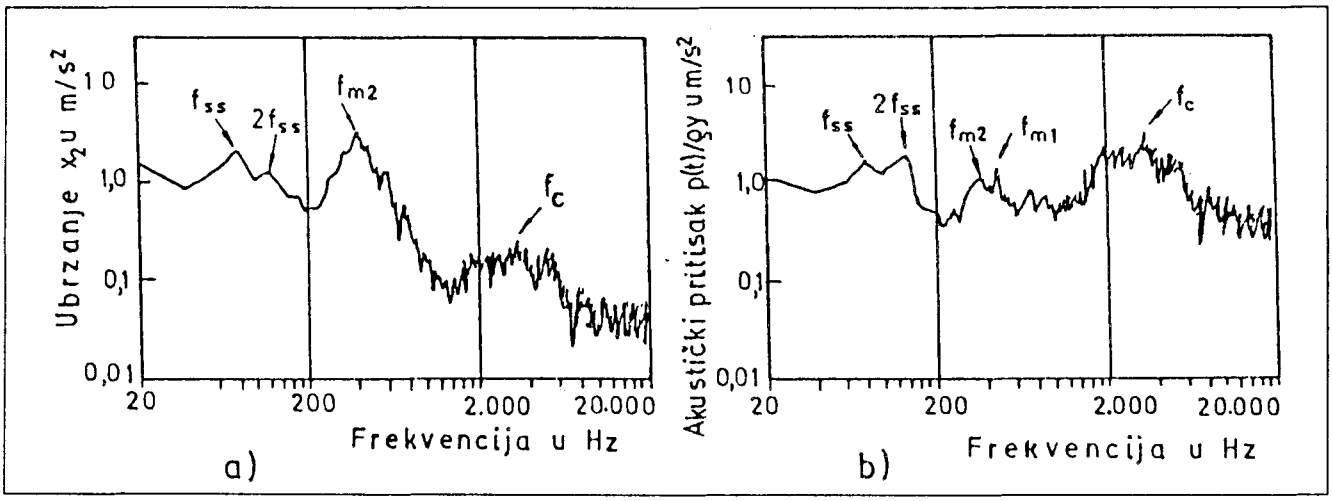
Energija talasnog kretanja delića mase je:

$$E_p = \frac{L_x\cdot L_y}{2\cdot\rho_o\cdot c_w^2}\cdot\sum_{m,n}\left|A_{mn}+C_{mn}\right|^2\cdot \frac{j}{2\cdot k_{zmn}}\cdot\left(e^{-2k_{zmn}z_b} - e^{2k_{zmn}z_b}\right) \quad (17)$$

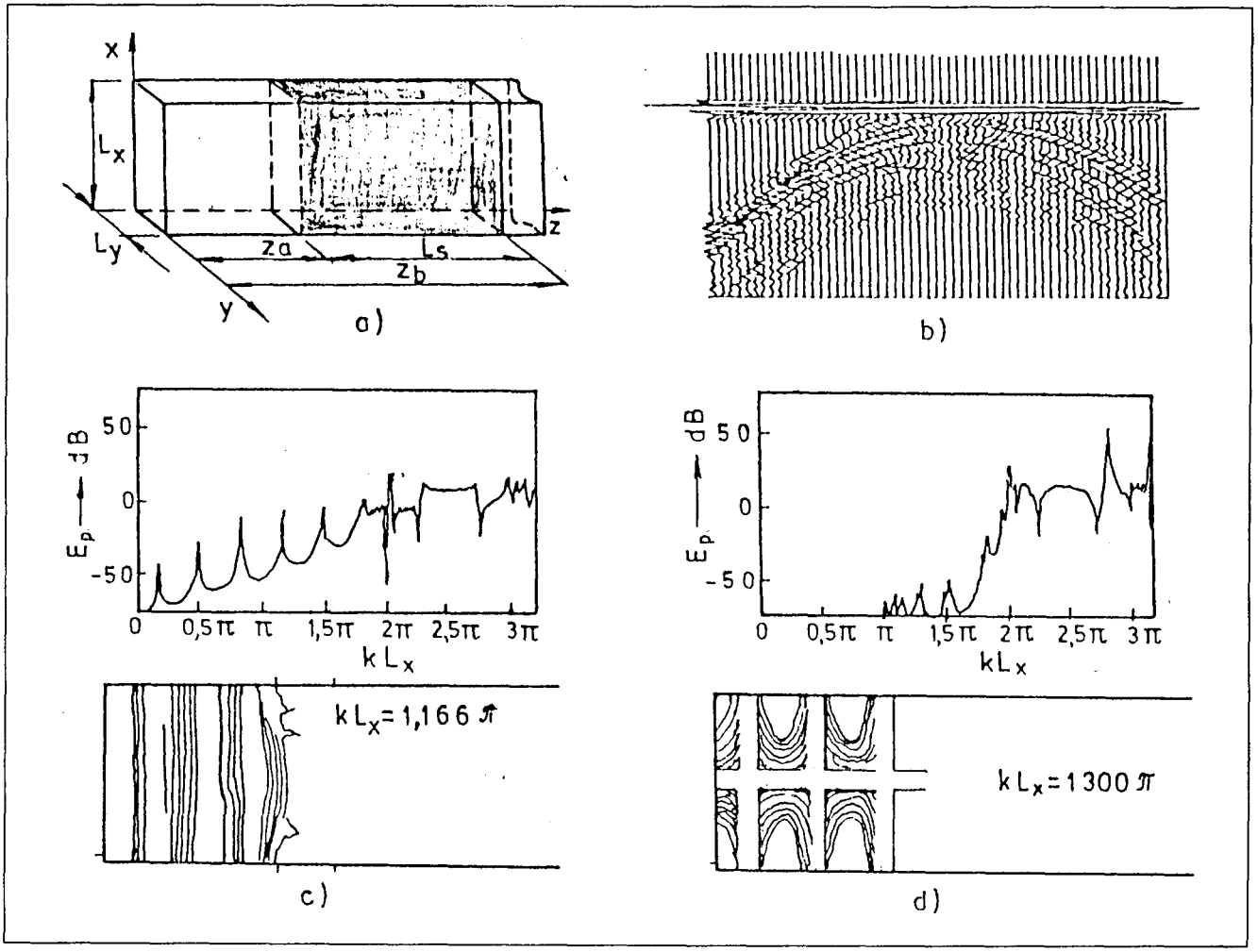
$$A_{mn} = \sum_{i=1}^{n_p}\frac{k\cdot\rho_0\cdot c_w}{A_p\cdot k_{mn}}\cdot v_p(i)\cdot p_{mn}(x_p(i), y_p(i)) \quad (18)$$

$$C_{mn} = \sum_{i=1}^{n_p}\frac{k\cdot\rho_0\cdot c_w}{2\cdot A_p\cdot k_{mn}}\cdot e^{jk_{zmn}L_s}\cdot v_s(i)\cdot p_{mn}(x_s(i), y_p(i)) \quad (19)$$

gde su $x_p(i)$, $y_p(i)$ koordinate tačke u kojoj se uvodi poremećaj, a $v_p(i)$ - konstantna kompleksna brzina zada-



Slika 5. Spektar vibracija (a) i buke (b) kliznih površina mašinskih delova



Slika 6. Modalno oscilovanje masa štapa pri visokim modalnim učestanostima [2]

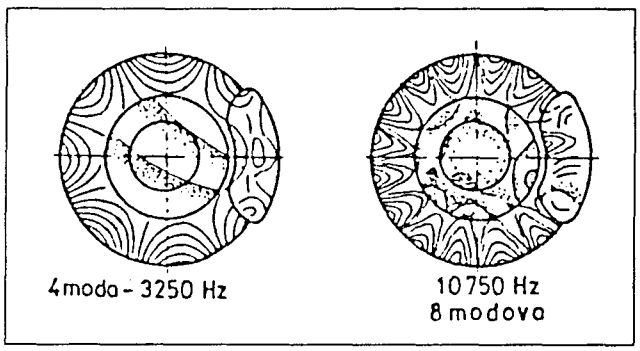
ta jedinici mase. Koordinate tačaka na reflektujućoj površini koja je na rastojanju L_s, su $x_s(i)$, $y_s(i)$, j - redni broj harmonika.

Na slici 6 prikazana je funkcija promene potencijalne energije u zavisnosti od učestanosti sopstvenih oscilacija. Prikazan je po jedan modalni oblik za $q=0$ i $q=1$. U prvom slučaju talasima je obuhvaćena celokupna zapremina štapa, a u drugom je ova zapremina podeljena u dve zone u pravcu ose x. Za ove učestanosti energija talasnog kretanja dostiže maksimalne vrednosti. Sopstvenim oscilacijama mase u unutrašnjosti mašinskih delova uvećava se nivo energije talasnog kretanja koja se jednim delom preko spoljašnjih površina prenosi na okolinu. Oscilacije u unutrašnjosti se prenose na spoljašnje površine. Mikro pomeranja površina mašinskih delova, i ako su veoma mala, mogu se snimiti.

Na slici 7 prikazano je oscilovanje površina diska kočnice snimljeno posredstvom holografskog interferometra. Modalne zone su radijalno raspoređene, a broj ovih zona se povećava sa povećavanjem učestanosti.

Elementarni delić površine mašinskog dela, pri ovom oscilovanju emituje zvuk. Svojim pomeranjem, ova površina potiskuje čestice vazduha sa kojima je u dodiru. Pri većoj brzini pomeranja, impuls zgušnjavanja je jači te je akustički pritisak i frekvencija zvučnog talasa veća. Prema Helmholdsovoj jednačini, u izabranoj tački u prostoru izvan mašinskog dela, akustički pritisak je:

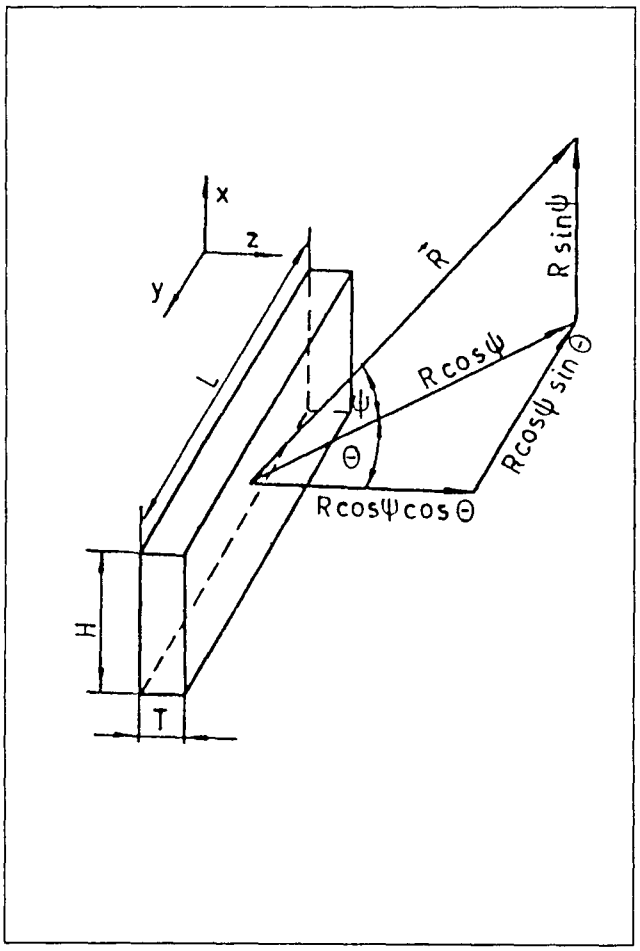
$$p\,(R,\omega) = \sum_{i=T,R,M}^{N} \frac{\rho_0 \cdot \ddot{q}_i(\omega) \cdot H \cdot L \cdot e^{jkR}}{4 \cdot \pi \cdot R} \cdot D_T \cdot D_H \cdot D_{Li} \qquad (20)$$



Slika 7. Izabrani modalni oblici oscilovanja disk-kočnica snimljeni posredstvom holografskog interferometra

Sumiranje se vrši za N elementarnih delova površine. Pritisak se izračunava u tački čiji je položaj određen vektorom R i za određenu kružnu učestanost ω. Veličine D_T, D_H i D_L su polinomi zavisni od orijentacije vektora položaja R u odnosu na elementarnu površinu. Za D_{Li} indeks i može biti T, R i M (D_{LT}, D_{LR}, D_{LM}).

Na slici 8 prikazan je elementarni deo površine, veličine HL, koji se pomera za veličinu T. Osim upravnog kretanja ova površina se pomera translatorno i u druga dva pravca i rotira oko sve tri ose. Sva kretanja u ravni HL su bez efekta na stvaranje zvučnog talasa. Osim translacije u pravcu normale (pomeranje T), delotvorne su rotacija oko pravca y i rotacija oko pravca x. Uticaji navedenih kretanja obuhvaćeni su veličinama D_{Li}. Tačka u kojoj se pritisak izračunava definisana je vektorom R čiji je pravac određen uglovima ψ i θ.



Slika 8. Model za određivanje akustičkog pritiska sekundarnih talasa koje emituju površine mašinskih delova

5. ZAKLJUČAK

Klizanjem, odnosno dejstvom sile trenja ostvaruju se elastične deformacije površinskog sloja i neravnina. Deformisanjem se akumuliše potencijalna energija koja nakon prestanka dejstva sile dovodi do vibracija u unutrašnjosti mašinskih delova i spoljnih površina. Ove površine svojim oscilovanjem emituju sekundarne zvučne talase.

Primarni zvučni talasi su prvenstveno posledica sudara neravnina na kliznim površinama, smicanja neravnina (stik-slip) i oscilovanja površinskog sloja. Efekti ovih procesa utvrđeni su upoređivanjem spektra izmerenih vibracija i zvuka snimljenog u neposrednoj blizini kliznih površina.

Sprezanje neravnina na površinama mašinskih delova u kliznom spoju prikazano je odgovarajućim matematičkim modelom koji omogućuje da se izračunaju učestanosti i veličine promene elastičnih deformacija.

Proces oscilovanja u unutrašnjosti mašinskih delova takođe je obrađen. Ovaj proces, kod nižih frekvencija može biti jedinstven i u granicama između spoljnih površina mašinskog dela. Kod viših frekvencija zapremina se deli na više modalnih zona u kojima je oscilovanje nezavisno. Modalne pregrade su površine koje reflektuju talase na jednu i na drugu stranu, tj. na kojima dolazi do uravnotežavanja potencijalne energije.

Stanje spoljašnjih površina pri modalnom oscilovanju prikazano je na primeru disk-kočnica. U nastavku je prikazan Helmoholdsov matematički model za izračunavanje akustičkog pritiska usled oscilovanja površine mašinskog dela.

LITERATURA

[1.] *Mohamed A. S., Ahmadi G., Loo F. T. C.*: **A Study on the Mechanics of Fatigue Dominated Friction Noise**, ASME Journal of Vibration and Acoustics, 1190, Vol. 112, pp 222-229.

[2.] *Stell J. D., Berhard R. J*: **Active Control of High Order Acoustical Modes in a Semi-Infinite Waveguide**, AMSE Journal of Vibration and Acoustics, 1991, Vol. 113, pp 523-531

[3.] *Fieldhouse J. D., Newcomb T. P.*: **A Study of Disc Brake Noise Using the Technique of Holographic Interferometry**, FISITA, Vol-1, I-Mech E, London 1992, pp 127-132

[4.] *Ognjanović M.*: **Wave Energy Movement in Mechanical Systems and Vibration and Noise Emission**, Journal of Machine Vibration, Springer - Verlag London Ltd. No. 3, 1994, pp 40-48

[5.] *Ognjanović M., Petković V.*: **The Noise With Variable Spectrum Exciting and Insulation in Machine Systems**, Saopštenja, Vol 23, pp 1-7

Noise Excitation by Machine Elements Slipping

By sliding the surface layers of the machine elements are elastically deformed, the roughness crash and are destroyed, etc. All these lead to accumulation of the potential energy which causes vibrations in the interior of the machine parts and on their surfaces. In the direct contact of roughness on the surface layers, especially by the crashes between roughness, the primary sonic waves are generated. In this paper is considered the model of energy accumulation in the form of virtual deformation work, then the model of elements coupling via the roughness on the surfaces, and emission of the primary sonic waves, modal oscillations in the interior of the machine elements, and the model of the secondary sonic waves by the surfaces that vibrate as membrane

Key words; noise, modal analysis, sonic waves.

Возбуждение шума при скольжении деталей машин

В процессе скольжения происходит упруге деформирование поверхностных слоёв деталей машин, соударяются и разрушаются неровности и пр. Такие явления вызывают накопление потенциальной энергии, побуждающей внутренние вибрации деталей машин и их поверхностей. При прямом зацеплении неровностей в поверностных слоях, особенно при их столкновении, возникают первычные звуковые волны, а на поверхностях деталей - вторичные волны.

Авторами работы изучена модель накопления энергии в форме виртуальной деформирующей работы, способ зацепления деталей вследствие неровностей на поверхностях, отдача первычных звуковых волн, модальные колебания внутренних деталей машин, вместе с моделью отдачи вторичных звуковых вол через поверхности деталей, дрожащих мембраной.

UDK 621.833.001.5.620.178.2

D. STOJANOVIĆ, D. IGNJATOVIĆ, S. IVKOVIĆ

Uticaj habanja zuba na efektivnost rada rotornih bagera

U radu je analiziran uticaj uticaj habanja zuba na efektivnost rada rotornih bagera, pre svega uticaj pohabanosti zuba na kapacitet, specifični otpor kopanju i specifičnu potrošnju energije.

Ključne reči: *rotorni bageri, zubi, habanje zuba, efektivnost rada.*

Ugalj je daleko najznačajniji energetski potencijal Srbije, i u strukturi ukupnih rezervi primarne energije učestvuje sa oko 84%. Procenjuje se da su preostale eksploatabilne rezerve uglja oko 15 milijardi tona, pri čemu lignit u strukturi ukupnih rezervi učestvuje sa 99% i uglavnom je skoncentrisan u četiri velika basena (Kolubara, Kosovo, Kostolac i Metohija). Površinska eksploatacija uglja u Srbiji učestvuje sa oko 98% u ukupnoj proizvodnji i odvija se danas na sedam površinskih kopova u okviru tri basena (Kolubara, Kostolac, Kosovo) sa godišnjom proizvodnjom od oko $40 \cdot 10^6$ tona uglja i $50 \cdot 10^6$ m^3 jalovine.

Ležišni i drugi uslovi omogućili su da se na ovim kopovima primeni visokoproduktivna mehanizacija kontinuiranog dejstva, tako da se otkopavanje uglja i jalovine najvećim delom vrši rotornim bagerima i vedričarima.

Ležišta lignita u Srbiji pripadaju mlađim geološkim formacijama izgrađenim od kvartarnih, pontskih i pliocenskih sedimenata koji pružaju takve specifične otpore kopanju da se na vedricama moraju ugrađivati rezni elementi (zubi). U poređenju sa vedricama bez zuba, ugrađeni zubi na vedricama za 2 do 2.5 puta povećavaju koncentraciju naprezanja na kontaktnoj ivici pa se stvaraju uslovi za lakše razaranje materijala. Pored toga, zubi štite rezni deo (nož) i samu vedricu od intenzivnog habanja i smanjuju procentualno učešće negabaritnih komada u masi otkopanog materijala.

Međutim, kako je u ukupnim masama koje se otkopavaju učešće sedimenata sa izrazito abrazivnim svojstvima (šljunkovi, peskovi, peskovite i prašinaste gline) izuzetno veliko, radni vek zuba je kratak, zastoji zbog njihove zamene česti, a troškovi relativno veliki.

dr Dušan Stojanović,
mr Dragan Ignjatović,
dr Slobodan Ivković,
Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Uravo zbog ovoga je od izuzetne važnosti da se za različite vrste materijala i geometriju vedrice i reznih elemenata odredi dozvoljeni stepen habanja i optimalno vreme zamene zuba, jer u protivnom, svako prekoračenje graničnog stepena habanja zuba ima za posledicu da rezna ivica vedrice ostaje nezaštićena, intezivno se haba i lomi, a često može doći i do oštećenja drugih elemenata rotornog točka. Osim toga, rad bagera sa ishabanim zubima povlači za sobom osetno povećanje specifičnog otpora na kopanje, pad efektivnog kapaciteta i povećanje specifične potrošnje energije.

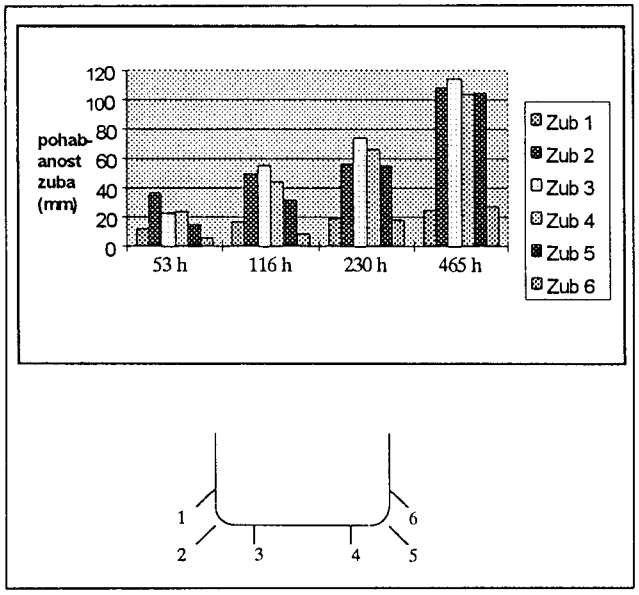
Pri otkopavanju mekih materijala granični stepen ishabanosti zuba nastupa pri smanjenju njihove dužine za 30 - 40%, uz moguću toleranciju do 50%, kada dolazi do povećanja potrebne obodne sile na rotornom točku za 10 - 15% i intenzivnijeg habanja zupčanika i ležajeva reduktora. Zubi tada moraju biti zamenjeni.

Kod otkopavanja čvstih materijala i uglja, granični stepen ishabanosti zuba nastupa već pri njihovom skraćenju za 10 - 15% kada može doći do određenih havarija elemenata rotornog točka.

Pored fizičko-mehaničkih svojstava materijala koji se otkopava, na intenzitet habanja zuba utiče njihova geometrija i raspored na reznoj ivici vedrice. Naime, pravilnim izborom uglova može se u mnogome uticati na intenzitet habanja zuba.

U zavisnosti od vrste materijala koji se otkopava koriste se i različite geometrije zuba. Tako na primer, kod otkopavanja šljunkovitog materijala obično se koriste samo ugaoni (lopatasti) zubi, a kod otkopavanja čvršćih materijala strelasti zubi. Broj zuba na vedricama, takođe, zavisi od vrste materijala, tako da se pri otkopavanju čvrstih glina obično ugrađuje 6 - 8 zuba, a pri otkopavanju ugljeva 8 - 12 zuba. Pri tome, intenzitet habanja zuba je različit. Najviše se habaju zubi postavljeni na uglovima vedrica (za otkopavanje glinovitih materijala po pravilu se koriste trapezaste vedrice), jer je taj deo vedrice naj-

opterećeniji u toku kopanja. Na slici 1 prikazan je intenzitet habanja pojedinačnih zuba pri otkopavanju glinovitog materijala bagerom SchRs 700. Pohabanost zuba merena je posle 53, 116, 230 i 465 časova rada bagera. Za to vreme bager je ukupno otkopao 752.874 m^3 glinovitog materijala.



Slika 1. Habanje zuba na vedrici rotornog bagera SchRs 700

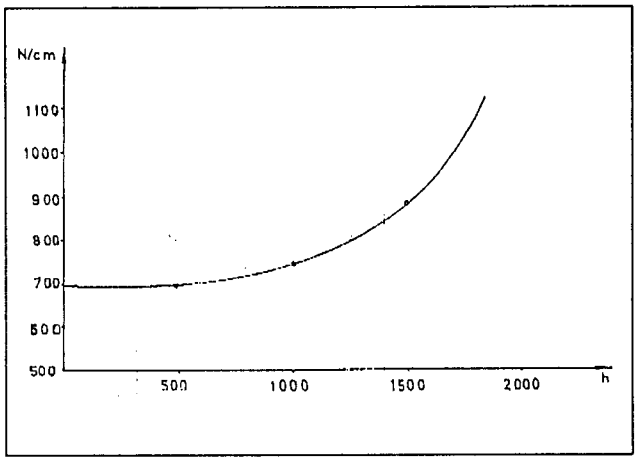
Katedra za mehanizaciju Rudarsko-geološkog fakulteta je istraživala uticaj stepena ishabanosti zuba na efektivnost rada rotornih bagera na našim površinskim kopovima uglja. Ilustracije radi, u tabeli 1. su prezentirani rezultati merenja uticaja stepena ishabanosti zuba na specifične otpore kopanju, specifičnu potrošnju energije i kapacitete bagera u uslovima radne sredine površinskog kopa Tamnava-istok (Kolubara).

Tabela 1.

	Specifični otpor na kopanje (N/cm)		Specifična potrošnja energije (kwh/m^3)		Kapacitet (m^3/h)
	srednji	max.	srednja	max.	srednji
Novi zubi	447	598	0.16	0.21	1654
Delimično ishabani zubi	487	633	0.18	0.22	1776
Potpuno ishabani zub	749	804	0.30	0.36	1070

Merenja su vršena na rotornom bageru SchRs 900 25/6 sa novim zubima, delimično ishabanim (posle 150 časova efektivnog rada) i sa zubima sa graničnim stepenom ishabanosti (posle 450 časova efektivnog rada).

Srednji specifični otpor na kopanje neposredno po ugradnji zuba iznosio je 447 N/cm, specifična potrošnja energije 0.16 kWh/m^3 i kapacitet bagera 1 654 m^3/h. Posle 150 sati efektivnog rada evidentiran je porast specifičnog otpora na kopanje od 8% (487 N/cm) i specifične potrošnje energije od 12% (0.18 kWh/m^3), pri čemu je kapacitet ostao skoro nepromenjen. Međutim, već posle 450 časova efektivnog rada bagera registrovan je osetan porast specifičnog otpora na kopanje 68% (749 N/cm), specifične potrošnje energije 87% (0.3 kWh/m^3) i pad kapaciteta 35% (1 070 m^3/h).



Slika 2. Uticaj pohabanosti zuba na vrednost specifičnog otpora na kopanje

Na drugim bagerima i drugim površinskim kopovima u okviru JP Elektroprivreda Srbije, a za iste ili slične uslove radne sredine, merenja su dala veoma slične rezultate. Na slici 2 prikazan je uticaj ishabanosti zuba na vrednost specifičnog otpora na kopanje na površinskim kopovima u basenu Kosovo. Do 500 časova rada specifični otpori na kopanje su bili skoro konstantni, a u dijapazonu od 1 000 do 1 500 časova rada evidentiran je osetan porast specifičnog otpora na kopanje i specifične potrošnje energije, a pad efektivnog kapaciteta. Kao racionalno vreme zamene zuba, da bi se izbegle negativne posledice, ne bi trebalo da se prekorači 1.300 časova efektivnog rada.

ZAKLJUČAK

Stoji, dakle, saznanje da je radna sredina na svim našim površinskim kopovima veoma abrazivna, da istraživanja u cilju optimalne geometrije zuba, njihovog broja i rasporeda na reznim ivicama vedrica, kao i kvaliteta tj. sastava materijala zuba treba intenzivirati, budući da su efekti koji se na ovaj način mogu ostvariti ekonomski vrlo primamljivi. Posebnu pažnju treba posvetiti i optimalnom vremenu zamene ishabanih zuba, kao bi se izbegle ili bar ublažile negativne posledice vezane pre svega za povećanje specifičnog otpora na kopanje i specifične potrošnje energije, pad kapaciteta, kao i potencijalnu mogućnost havarijskih oštećenja elemenata rotornog točka, pogotovo vedrica budući da ostaju nezaštićene.

LITERATURA

[1.] *Stojanović, D., Ignjatović, D., i Ivković, S.*, **Uticaj specifičnog otpora na kopanje na efektivnost rada rotornih bagera**, NIP 0816, tema 2.3.

[2.] *Ignjatović, D.*, **Izbor metode za određivanje otpora na kopanje rotornim bagerima u uslovima površinskih kopova lignita Kolubare**, Magistarski rad, Beograd, 1993.

Influence of The Tooth Wear on Rotational Excavators Working Efficiency

In the paper is analyzed the influence of the tooth wear on the working efficiency of the rotational excavators, before all the influence of the tooth wear on capacity, specific resistance to digging and specific energy consumption.

Key words: Rotational excavators, teeth, tooth wear, working efficiency.

Воздействие изнашивания зубьев на эффективность работы роторных экскаваторов

Работа посвящена исследованию воздействия изнашивания зубьев на эффективность работы роторных экскаваторов, прежде всего влияния изношенности на ёмкость, удельное сопротивление рытью и удельный расход энергии.