

# tribologija u industriji

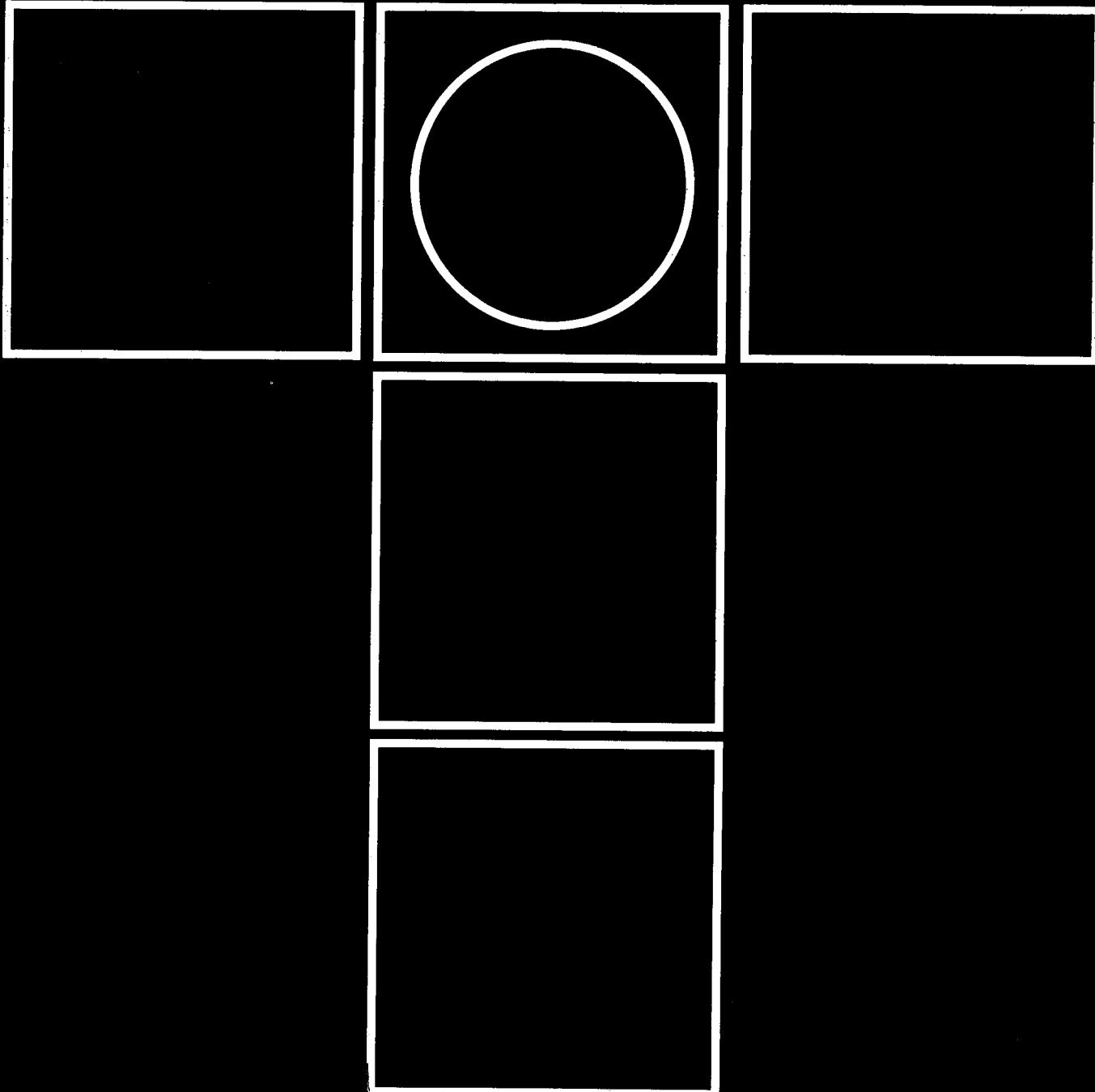
tribology in industry ◇ трибология в промышленности

YU ISSN 0351-1642

GODINA XVII

DECEMBAR 1995.

4



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

# tribologija u industriji

tribology in industry ◊ трибология в промышленности

sadržaj 

contents 

UVODNIK INTRODUCTION ВВЕДЕНИЕ	R. MITROVIĆ: 35 godina studija mašinstva u Kragujevcu ◊ 35 Years of Mechanical Engineering Studies in Kragujevac ◊ 35 лет работы Машиностроительного факультета в городе Крагуевац . . . . .	99
ISTRAŽIVANJA RESEARCH ИССЛЕДОВАНИЯ	S. MITROVIĆ, Z. CANIĆ: Analiza stanja pohabanosti najugroženijih elemenata TMS-a linija za ekstruziju gume i plastike ◊ Analysis of Wear Status of The Most Endangered Elements ◊ of The TMS Lines for The Rubber and Plastics Extrusion ◊ Анализ состояния изношенностии наиболее уязвимых элементов ТМС - линий для экструзии резины и пластмассы . . . . .	103
	S. ALEKSANDROVIĆ: Uticaj promenljivih tribouslova na položaj krive granične deformabilnosti tankih limova pri nemonotonom deformisanju ◊ Influence of The Variable Tribous- Conditions on Position of The Limiting Deformability Curve of The Thin Sheets ◊ Влияние изменчивых трибологических условий на положение кривой предельной деформируемости тонкой листовой стали . . . . .	107
	B. JEREMIĆ, M. BABIĆ, M. MEYER, P. TODOROVIĆ, N. MILIĆ: PVD Coatings and Dynamic Processes in The Contact Zone ◊ PVD prevlake i dinamički procesi u zoni kontakta ◊ ПВД покрытия и динамические процессы в зоне контакта . . . . .	111
NOVOSTI NEWS НОВОСТИ	R. MITROVIĆ, N. VOJKOVIĆ: Kapacitet linija za ekstruziju gume i plastike kao funkcije pohabanosti elemenata TMS ◊ Capacity of The Rubber and Plastics Extrusion Lines as a Function of The TMS Elements Wear ◊ Производительность линии для экструзии резины и пластмассы в качестве функции изношенностии деталей трибо-механической системы . . . . .	116
KNJIGE I ČASOPISI BOOKS AND JOURNALS КНИГИ И ЖУРНАЛЫ	S. MARKOVIĆ, D. JOSIFOVIĆ: Uštede u materijalu i troškovima obrade pohabanih zupčanika metodom regeneracije ◊ Savings in Material and Machining Costs of The Worn Tooth Gears by The Regeneration Method ◊ Экономия материала и снижение расходов восстановлени изношенных зубчатых колёс . . . . .	120
NAUČNI SKUPOVI SCIENTIFIC MEETINGS НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ	N. MILIĆ, B. JEREMIĆ, M. BABIĆ: Dinamičko ponašanje glavnih vretena obradnih centara ◊ Dynamic Behavior of The Machining Centers Main Spindle ◊ Динамическое поведение шпинделя токарного станка, обрабатывающих систем . . . . .	127
	. . . . .	133
	. . . . .	134
	. . . . .	136

**R. MITROVIĆ**

# 35 godina studija mašinstva u Kragujevcu

Mašinski fakultet u Kragujevcu počeo je rad kao Odeljenje Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 1960. godine.

Samostalni fakultet, u sastavu Beogradskog univerziteta, postaje 1971.

Zajedno sa ovdašnjim fakultetima, učestvovao je u formiranju Univerziteta u Kragujevcu, 1976. godine u čijem sastavu se i sada nalazi.

Značajno je doprineo privrednom razvoju Kragujevca, Republike i zemlje.

Odlikovan je Ordenom zasluga za narod sa srebrnim zracima.

Vesnik je radjanja visokog školstva novijeg datuma i pojave Univerziteta u Kragujevcu.

Najpre kao Odeljenje, a zatim kao Fakultet, označiće postupni povratak Liceja, preteče Beogradskog univerziteta, u njegov zavičajni grad, našta je Kragujevac čekao duže od jednog stoteća.

Potrebu za tim Kragujevac je imao u pojavi i razvoju automobilske industrije, koja ga je povezala sa privredom Jugoslavije, uvodila u međunarodnu podelu rada, transver znanja i tehnologije.

Dogodilo se to istovremeno sa početkom utemeljivanja nove razvojne filozofije o demetropolizaciji visokog školstva i stvaranja kadrova za dina-

mičniji privredni i društveni razvoj u unutrašnjosti, kao i veće pristupačnosti visokog obrazovanja svim slojevima društva.

Odeljenje Mašinskog fakulteta Beogradskog univerziteta počelo je da radi 10. oktobra 1960. godine u adaptiranim prostorijama istočnog dela Gimnazije. Imalo je 106 studenata.

Na taj način, kao pre 122 godine, u znatno izmenjenim uslovima, pod istim krovom, počeli su da žive jedna srednjoškolska i jedna visokoškolska ustanova nekada Gimnazija i Licej, sada Gimnazija i Mašinski fakultet.

Uz pomoć sredstava Kragujevačkog sreza u Gimnaziji je adaptiran prostor od 920 kvadratnih metara, izgrađen amfiteatar, laboratorije, učionice i obezbeđena je naknada za lične dohotke nastavnog i pomoćnog osoblja.

Međutim to nije pružalo potpune uslove za razvoj Fakulteta, pa je trebalo podići novu zgradu.

Izgradnja modernog objekta, na površini od preko 6.300 kvadrata, počela je aprila 1961. godine kraj Gradskog parka, tik uz tadašnju Višu pedagošku školu. Projektom je bilo predviđeno da zgrada fakulteta može da obezbedi nastavu za 500 studenata.

Već novembra 1962. godine, u jedan deo osposobljenih prostorija uselila

se nova, treća po redu generacija studenata, dok je definitivno preseljenje iz zgrade Gimnazije izvršeno 5. januara 1963. godine.

Pored zgrade Fakulteta nalazi se zgrada Instituta sa laboratorijskim prostorijama paviljonskog tipa. U njoj su smeštena 23 odeljenja sa ukupnom površinom od preko 1040 kvadrata.

Svečano otvaranje zgrade Fakulteta obavljeno je 20. oktobra 1963. godine. Tom prilikom uručene su diplome prvog stepena svršenim studentima prve i druge generacije.

Prvi diplomski rad na Odeljenju Fakulteta odbranjen je 10. oktobra 1964., prvi magistarski 23. novembra 1968. a prva doktorska teza 24. juna 1969. godine.

Diplomirani studenti odmah su nalažili posao i doprinosili industrijskom razvoju zemlje, a posebno Zavodima "Crvena zastava", koji su pokazivali poseban interes da nakon studija dobiju sebi potreban profil stručnjaka.

Najbolji diplomirani studenti birani su za asistente na fakultetu, počinjali da se bave nastavničkim pozivom i naučno istraživačkim radom. Tako je stvarana kadrovska baza koja je bila uslov da se Odeljenje izdvoji iz sastava Mašinskog fakulteta u Beogradu i

preraste u samostalni Mašinski fakultet 2. decembra 1971.

Godine 1976. kada je Kragujevac obeležavao 5 vekova postojanja, na čelu sa Mašinskim fakultetom u Kragujevcu, formiran je Univerzitet "Svetozar Marković".

Kada se osamostalio, Mašinski fakultet je najpre konstituisan kao organizacija udružena u Univerzitet, koja u svom sastavu ima odseke, odeljenja, službe i kabinete kao organizacione celine nastavno-naučne jedinice.

Institut Fakulteta, koga sačinjavaju zavodi i laboratorije u kojima se izvodi naučnoistraživački rad i praktičan deo nastave za studente, organizaciono je povezan sa naučno-nastavnom jedinicom.

Zajedničke službe u kojima se obavljaju opšti poslovi pravne, administrativne, finansijske, tehničke, informativne i slične prirode u svom sastavu imaju sva prateća odeljenja.

Dekan ima tri pomoćnika - prodekan - za finansije, za nastavu i za studentska pitanja.

Na Mašinskom fakultetu postoje dva vida obrazovanja kadrova:

- za spremanje stručnjaka visoke spreme - diplomiranih mašinskih inženjera
- za spremanje stručnjaka više stručne spreme - mašinskih inženjera

Na Mašinskom fakultetu organizuju se i posdiplomske studije u cilju formiranja istraživačkog i nastavnog kada i obrazovanja visokostručnih akademskih zvanja.

Ovu organizaciju Mašinskog fakulteta karakteriše period do 1980. godine. On će kasnije doživeti kvalitativne promene.

U periodu od 1987. do 1991. godine izgrađene su nove zajedničke laboratorije Mašinskog fakulteta i Zavoda "Crvena zastava" iz Kragujevca u površini od 8.700 kvadratnih metara, raspoređenih u tri zasebna objekta. Danas, Mašinski fakultet u Kragujevcu raspolaze sa oko 15.000 kvadratnih

metara prostora sa izrazito modernom, savremeno opremljenom i kadrovski sposobljenom naučnom i obrazovnom institucijom. Na Fakultetu radi 24 redovnih i 10 vanrednih profesora, 7 docenata, 38 asistenata i asistenata-pripravnika. Fakultet je angažovao i angažuje jedan broj naučnih radnika sa drugih fakulteta i institucija u zemlji, iz inostranstva i privrede.

Na Mašinskom fakultetu zvanje mašinskog inženjera steklo je 1.023, diplomiranog inženjera mašinstva više od 2.000, specijalista 12, magistara tehničkih nauka 136 i doktora tehničkih nauka 49 kandidata.

Fakultet je realizovao na stotine istraživačkih tema fundamentalnog, primjenjenog i razvojnog karaktera, saopštio i objavio mnoštvo naučnih i stručnih radova na konferencijama, savetovanjima i seminarima nacionalnog i internacionalnog karaktera i u vodećim nacionalnim i internacionalnim časopisima.

Fakultet je objavio više publikacija naučnog, monografskog, udžbeničkog i drugog karaktera, značajnih za obavljanje obrazovne i naučne delatnosti, usavršavanje i inoviranje znanja saradnika i stručnjaka iz privrede.

Fakultet izdaje i dva časopisa međunarodnog karaktera koji doprinose širenju naučne misli u zemlji i inostranstvu.

Razvio je i razvija saradnju sa nizom naučnih i drugih institucija iz zemlje i inostranstva, nastojeći i na taj način da obezbedi sve neophodne pretpostavke za obrazovanje i usavršavanje svojih nastavnika i saradnika.

Obrazovna delatnost na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu sada se odvija kroz studije i posebne oblike stručnog obrazovanja i usavršavanja. Studije na fakultetu su osnovne i posdiplomske.

Osnovne studije za sticanje visokog obrazovanja u oblasti mašinstva, na srpskom jeziku, se organizuju na pet smerova: proizvodno mašinstvo, ma-

šinske konstrukcije i mehanizacija, motorna vozila i motori, energetika i procesna tehnika, primenjena mehanička i automatsko upravljanje.

Fakultet je spreman da organizuje i osnovne studije na engleskom jeziku na smeru za opšte mašinstvo.

Pod postdiplomskim studijama podrazumevaju se: specijalističke, magistarske, doktorske i posdoktorske. Inače, Fakultet organizuje postdiplomske studije na svim smerovima, iz odgovarajućih oblasti usmerenja koja se neguju na Fakultetu.

Institut, kao naučno-istraživačka jedinica Fakulteta, bavi se naučnom, istraživačkom i obrazovnom delatnošću. Čine ga 8 laboratoriјa, 8 centara, računarski centar, biblioteka sa 20.000 knjiga, i 138 naslova domaćih i stranih časopisa, fotolaboratoriјa sa kopirnicom i služba za tehničke poslove.

Svojim prostornim, kadrovskim i materijalnim resursima savremeno opremljenim laboratoriјama i centrima uz maksimalnu računarsku podršku istraživanjima, Institut se svrstao u jednu od najmodernijih naučno-istraživačkih organizacija finansiranih od strane Ministarstva za nauku i tehnologiju i velikog broja privrednih organizacija. Pored realizacije eksperimentalnog dela nastave obezbeđuje i realizaciju fundamentalnih i primenjenih naučnih i razvojnih istraživanja u oblasti mašinske tehnike. Zatim izradu studija, ekspertiza projekata i analiza u oblasti mašinstva, izradu prototipova i modela proizvoda, razvoj informacionih sistema i još puno toga.

Pored projekata finansiranih od strane domaćih finansijera Međunarodna Komisija Evropske ekonomiske zajednice počela je sa finansiranjem jednog TEMPUS programa na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu, koji je od uvodjenja sankcija u fazi mirovanja. U realizaciji TEMPUS programa pored našeg Fakulteta učestvuju i druge međunarodne institucije kao što su Harvard University

(SAD), College du Page (SAD), Universidade da Beira Interior (Portugalska) i Tehnički Univerzitet u Drezdu (Nemačka).

Naredne aktivnosti Mašinskog fakulteta u Kragujevcu će biti usmerene na modernizaciju nastavnog procesa i

poboljšanja uslova studiranja na realizaciji započetih i obezbedjenju novih naučno-istraživačkih projekata, na opremanju novoizgrađenog laboratorijskog prostora, na akreditaciji laboratorija za atestiranje raznih mašina i uređaja i izdavanje drugih certifikata.

Analizom datog prošlog, sadašnjeg i budućeg stanja na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu jasno je da je po jedan dinamički sistem koji je u neprekidnom razvoju sa vidnim rezultatima progresa.

## 35 Years of Mechanical Engineering Studies in Kragujevac

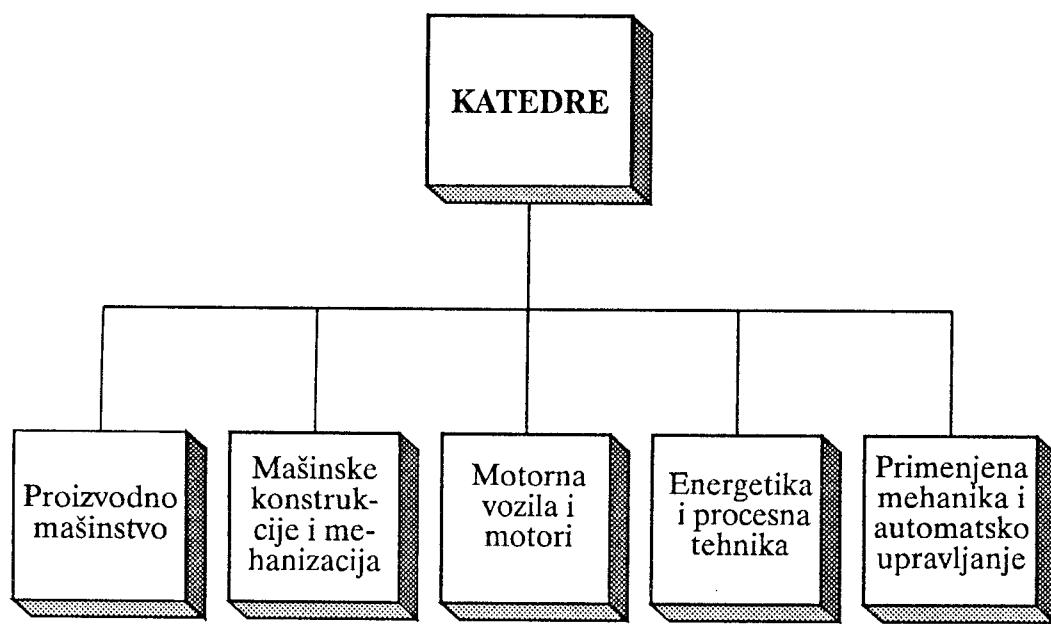
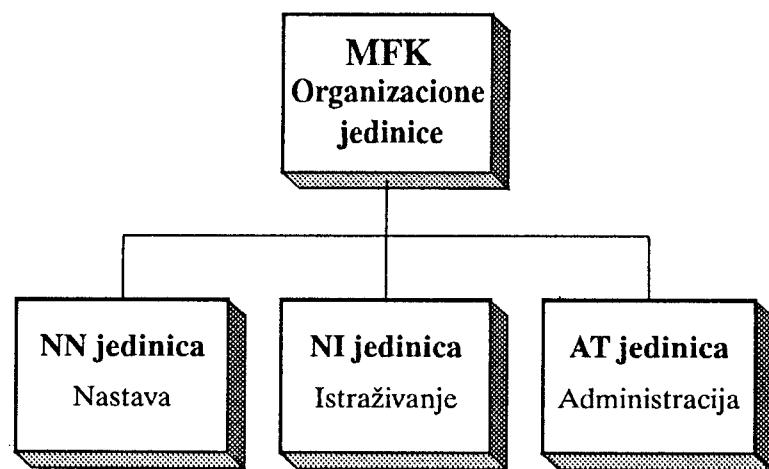
*Faculty of Mechanical Engineering celebrates this year the 35th Anniversary of its successful work and existence. Besides the numerous results in educational - scientific and scientific - research work, this Faculty has achieved distinguished results in numerous international and domestic educational and scientific institutions.*

*This International Journal "Tribology in Industry", whose pages begin with this Foreword, had started 17 years ago as a result of work of enthusiasts which originated and matured at this Faculty, as a result of full maturity of one of the Yugoslavia's leading laboratories for Metal Machining and Tribology, a. k. a. LOMT. These are the reasons why, within its 35th Anniversary celebration, this Faculty was honored to get space in this well known Journal, to briefly presents its Past, Present and Future.*

## 35 лет работы Машиностроительного факультета в городе Крагуевац

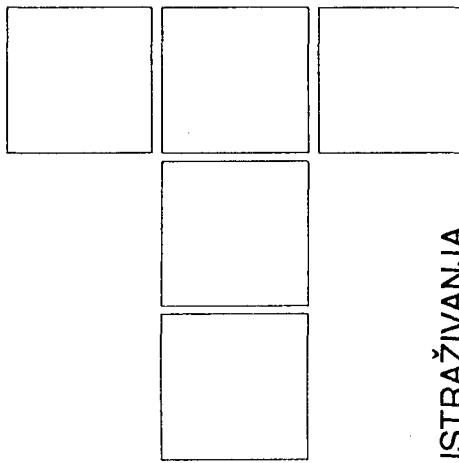
*Машиностроительный факультет в городе Крагуевац в наступающем году отмечает 35-ую годовщину существования и успешной работы. Наряду с многочисленными результатами, осуществляемыми им в инженерной и научно-исследовательской работе, факультет добился и значительных успехов в сотрудничестве с многими зарубежными университетами и научными учреждениями.*

*И настоящий международный журнал "Трибология в промышленности", начинаящийся этим введением, 17 лет тому назад начали выдавать энтузиасты, выросшие на Машиностроительном факультете, в результате развития и успешной работы, ведущей в Югославии Лаборатории по обработке металлов и трибологии, известной под сокращенным названием ЛОМТ. По этому журналу по поводу юбилея предсказывался Машиностроительному факультету коротко предсказавший своё прошлое, настоящее и планируемое будущее.*



S. MITROVIĆ, Z. CANIĆ

# Analiza stanja pohabanosti najugroženijih elemenata TMS-a linija za ekstruziju gume i plastike



ISTRAŽIVANJA

Osnovu svake ekstruzione linije za izradu izolacije i plasteva na provodnicima i kablovima čini ekstruder. To je sklop cilindra i puža prikazan na slici 1. Ovaj sklop, zajedno sa ekstruzionim materijalom predstavlja tribomehanički sistem (TMS) od čijeg stepena pohabanosti zavisi funkcionalnost i proizvodnost ekstruzione opreme kao i kvalitet ekstrudovanog gumenog i plastičnog materijala.

Zadatak sklopa cilindra i puža ekstrudera je da se u njima termoplastični materijal dovede u stanje plastičnosti, tj. stanje najpogodnije za nanošenje na provodnik, a isto-

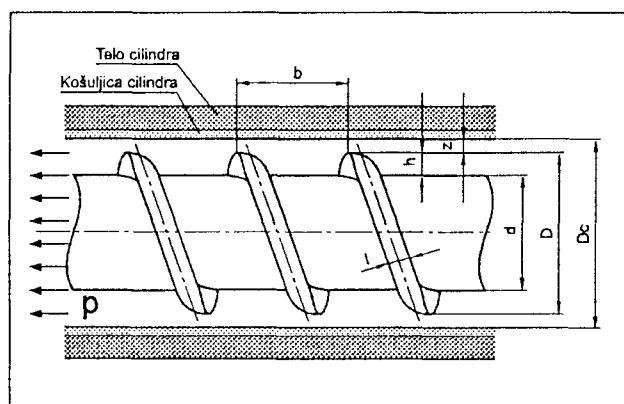
vremeno u takvo stanje homogenosti i umešanosti bez ikakvog prisustva vazduha i vlage (šupljikavosti i isparenja), koji bitno umanjuju otpornost izolacije i plašta na visoke napone i kvari estetski izgled plašta i izolacije na kablu.

U sklopu cilindar - puž odigravaju se vrlo složeni termodynamički procesi termoplastičnog materijala koji se nаноси на проводник tj. kabl.

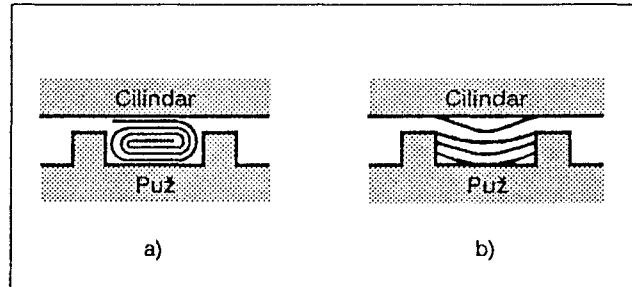
Koji su to bitni termodinamički procesi koji se dešavaju?

Posmatrajući kretanje termoplastičnog materijala u samom kanalu puža i cilindra, slika 2, moguća su dva strujanja jako viskoznog fluida.

Na slici 2.a prikazano je složeno strujanje jako viskoznog termoplastičnog materijala sastavljeno od turbolentnog i laminarnog strujanja, a na slici 2.b prikazano je čisto laminarno strujanje.



Sl. 1. Osnovna geometrija TMS-a puž-cilindar

Sl. 2. Strujanje termoplastičnog materijala:  
a) složeno; b) laminarno

Slobodan Mitrović, dipl.ing.,  
PP "MULTICOMP" Kragujevac  
Zoran Canić, dipl. ing.,  
DD "FEK, HK "KABLOV", Jagodina

Sa gledišta dovođenja plastičnog materijala u stanje najpogodnije za nanošenje na kabl (što se tiče otpornosti na visoke napone i estetike), najpogodniji termodinamički proces je proces prikazan na slici 2.a.

Analizirajući literarno prikazane koeficijente trenja za termoplastične materijale i čelik, koji direktno izazivaju površinsko habanje ekstruzionog puža i cilindra, dolazi se do zaključka da je veći koeficijent trenja kod složenog strujanja jako viskoznog fluida.

Koeficijent trenja za složeno strujanje za slučaj a,  $\alpha_{ka}$  (turbulentno + laminarno) moguće je izraziti kao zbir koeficijenata trenja za turbulentno strujanje  $\alpha_{kt}$  i za laminarno strujanje  $\alpha_{kl}$ , u obliku:

$$\alpha_{ka} = \alpha_{kt} + \alpha_{kl}$$

a koeficijent trenja za slučaj b, strujanje  $\alpha_{kb}$  je:

$$\alpha_{kb} = \alpha_{kl}$$

Habanje  $H(\alpha)$  puža i cilindra ekstrudera je u direktnoj funkciji od veličine koeficijenata trenja za složeno strujanje u kanalima ekstruzionog puža i cilindra i ima oblik:

$$H(\alpha) = f(\alpha_{kt} + \alpha_{kl})$$

Da bi se ustanovilo stanje pohabanosti ekstruzionih puževa i cilindara i u kojoj meri je prisutno, treba pratiti nekoliko karakterističnih parametara:

- kapacitet ekstrudera koji je smanjen ili se menja u toku rada za stalni broj obrtaja puža  $n = \text{const}$ :

$$Q = k \frac{p}{\eta (\alpha_{kt})}$$

gde su:  $Q$  - zapreminski protok mase kroz glavu ekstrudera ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )

$p$  - pritisak mase u glavi ekstrudera ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\eta$  - efektivna viskoznost mase ( $\text{kg s}/\text{cm}^2$ )

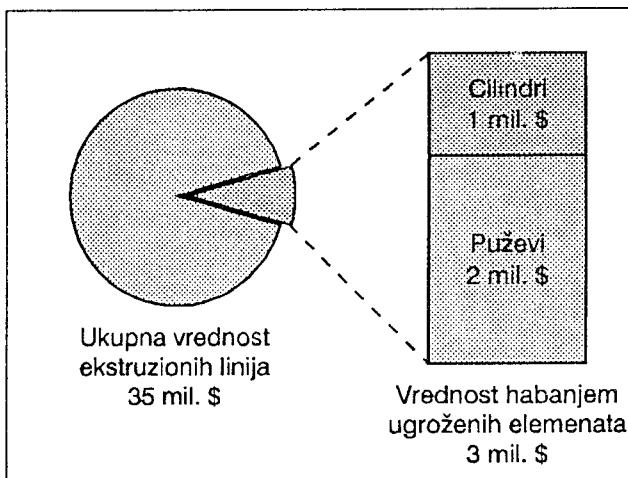
- kvalitet rastopljene mase nije zadovoljavajući za normalno propisane režime prerade, a to se ogleda u neumešanosti mase, što znači da masa nije homogena,
- na izolacijama i plaštevima nanešenim na provodnici ma i kablovima pojavljuju se neujednačena zadebljanja tj. javlja se neravnomernost prečnika izolacije provodnika ( $d \neq \text{const}$ ), odnosto, prečnik preko izolacije i plašta je van dozvoljenih odstupanja,
- pojava zrnaca i mehurića po površini izolacije i plašta i
- promena geometrije ekstruzionog puža i unutrašnjeg prečnika cilindra, tj. povećanje zazora između temena navoja puža i unutrašnjeg prečnika cilindra.

Veličina pohabanosti usled trenja se ogleda u promeni veličine zazora između puža i cilindra, koji je veći kod ekstrudera koji duže vremena rade. Najpouzdaniji način utvrđivanja veličine pohabanosti puža i cilindra vrši se merenjem međusobnog zazora. Ovako dobijeni zazor predstavlja parametar na osnovu koga se može tačno predvideti ponašanje ekstrudera u proizvodnji, odrediti

režim rada u eksplataciji i utvrditi da li pristupiti reparaciji sklopa TMS-a cilindar - puž ili nabavci novog.

Danas, najveći jugoslovenski proizvođač kablovskih proizvoda, kablovskog pribora, konektora, kablovskih konfekcija i lak žice, Holding kompanija "KABLOVI" iz Jagodine, u svoja četiri deonička društva - FEK, TK, REKOVAC i ELMOS, raspolaže sa ukupno 65 linija različitih kapaciteta za ekstruziju svih materijala koji podleže ekstruzionim postupcima prerade.

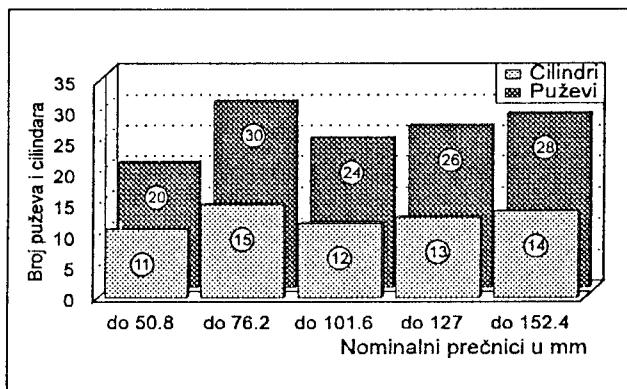
Tržišna vrednost svih instaliranih ekstruzionih linija, u ovoj kompaniji, iznosi cca 35 miliona US\$, slika 3.



Sl. 3. Vrednost ekstruzionih linija i habanjem ugroženih elemenata

Na slici 4 prikazani su ekstruzioni puževi i cilindri u HK "KABLOVI" grupisani prema veličini nominalnih prečnika puževa i cilindara. Poznato je da su u HK "KABLOVI" oko 70% ekstruzionih linija nalaze u grupi većih nominalnih prečnika ( $\phi 4 - 6"$ ), sa većim kapacitivnim mogućnostima. Ostalih 30% ekstruzionih linija se koristi za izolovanje tanjih žila i žice koje rade sa znatno poštrenim režimima rada, u prvom redu sa većim linijskim brzinama oblaganja ( $\phi 2-4"$ ).

Ukupna vrednost habanjem ugroženih elemenata TMS-a iznosi približno tri miliona US\$ od čega dva miliona



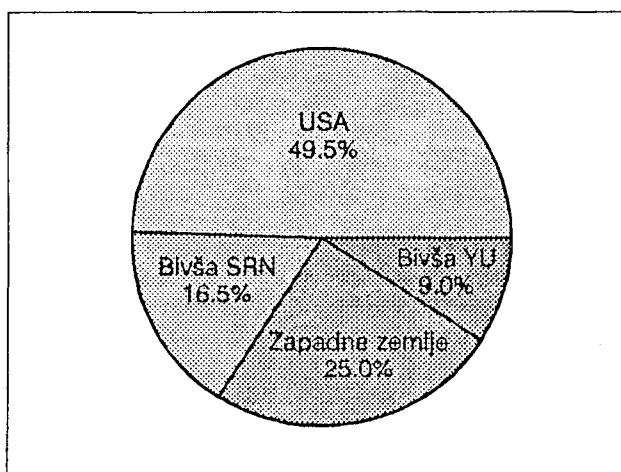
Sl. 4. Identifikovani broj puževa i cilindara u HK "KABLOVI"

US\$ otpada na puževe (ugrađene i rezervne), a jedan milion US\$ investiran je u cilindre.

Kako tokom vremena eksploracije dolazi do habanja elemenata TMS-a, odnosno puževa i cilindara, to se ovi skupi elementi smatraju potrošnim materijalom. S obzirom da je vek trajanja pomenutog TMS-a relativno dug - kreće se od 8 do 12 godina pri punoj eksploraciji ove opreme, a nadzor nad stanjem pohabanosti ove opreme nedovoljno kontrolisan, dolazi do otkaza koji prouzrokuju dugotrajne zastoje na ekstruzionim linijama.

Danas, u vreme trajanja sankcija u našoj zemlji, ekstruziona oprema radi sa približno jednočetvrtinskim kapacitetom, pa je ovakve otkaza moguće često izbeći prelaskom na ispravnu istonamensku liniju, dok ekstruziona linija u otkazu čeka bolja vremena.

Dosadašnja praksa je bila takva da su se pohabani elementi TMS-a nabavljali po potrebi od proizvođača uvozne opreme (49.5% iz USA, 16.5% is bivše SRN, 25% iz drugih zapadnih zemalja) dok su nabavke iz bivše SFRJ bile pokrivene sa svega 9%, slika 5.



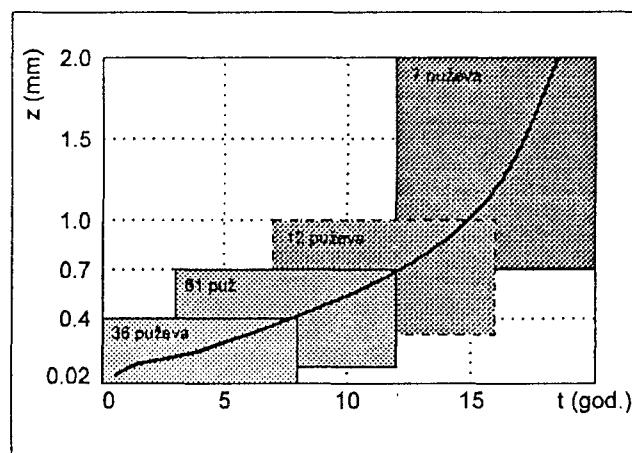
Sl. 5. Nabavka pohabanih elemenata

Kvalitet opreme i samih ekstrudera nije toliko vezan za zemlju isporučioca, koliko za samog proizvođača. Pokazalo se da je najkvalitetnije ekstruzione puževe i cilindre HK "KABLOVI" dobio od firmi "MAILLEFER" iz Švajcarske i "DAVIS STANDARD" iz USA. Dok je npr. proizvođač ove složene opreme iz USA "JOHN ROYLE" isporučivao puževe i cilindre male tvrdoće, što je bitno umanjivalo njihovu otpornost na habanje.

U cilju održavanja ekstruzionih linija u mobilnom stanju, ne čekajući uvoz vitalnih rezervnih delova, pokušaji su da se postojeći puževi i cilindri regenerišu, a i proizvode u domaćim uslovima. Mogućnost regeneracije oštećenih i izrade novih puževa u domaćim uslovima u nekoliko slučajeva potvrđio je Mašinski fakultet u Kragujevcu, koji namerava da, u zajednici sa DD "INSTITUTOM FKS" i DD "FEK" HK "KABLOVI" iz Jagodine i specijalizovanog PP "MULTICOMP" iz Kragujevca, sistematski pridje

razrešavanju ovog, za našu kablovsku industriju, važnog problema.

Analizom stanja pohabanosti puževa na nivou HK "KABLOVI" došlo sa do globalne aproksimativne krive habanja, slika 6, koja daje funkcionalnu zavisnost zazora ( $z$ ) između puža i cilindra u toku vremena eksploracije ( $t$ ) izraženog u godinama. Utvrđeno je da se maksimalni dozvoljeni zazor između puža i cilindrata, a da kvalitet ekstrudera ostaje u tolerantnim granicama, kreće do 0.7 mm pri prosečnoj eksploraciji ekstruzionih linija od oko deset godina.



Sl. 6. Globalna kriva habanja puževa u HK "KABLOVI"

Pošto je vreme ( $t$ ) rada ekstrudera u direktnoj sprezi sa veličinom pohabanosti (veličinom zazora  $z$ ), sa gledišta stepena pohabanosti ekstrudere u HK "KABLOVI" možemo svrstati u nekoliko grupa:

- ekstrudere koji su u eksploraciji proveli do 8 godina (sa gledišta habanja - vreme optimalnih eksploracijskih karakteristika),
- ekstrudere koji su u eksploraciji do 12 godina (sa gledišta habanja - vreme još uvek zadovoljavajućih eksploracijskih karakteristika),
- ekstrudere koji su u eksploraciji do 16 godina (sa gledišta habanja - ove mašine treba ozbiljno preispitati s obzirom na veličinu izmerenog zazora ( $z$ ) i na probleme koji zbog toga prate proizvodnju), i
- ekstrudere koji su se zadržali u eksploraciji do 20 godina (sa gledišta habanja - ne zadovoljavaju kapacitivne niti kvalitativne proizvodne zahteve).

U optimalan vek rada puža i cilindra spadaju svi oni ekstruderi kod kojih izmereni zazor ( $z$ ) ne prelazi 0.4 mm, a njih s obzirom na broj ekstruzionih linija ima malo, oko 36.

Najveći broj ekstruzionih puževa i cilindara su oni koji zadovoljavaju osnovne proizvodne zahteve, ukupno 61. Zazori kod njih se kreću do 0.7 mm, što se smatra još uvek zadovoljavajućim.

Praktično svi ekstruzioni puževi i cilindri kod kojih su zazori veći od 0.7 mm su nepogodni za upotrebu, ali

situacija u kojoj se nalazi današnja privreda, primorava na rad sa njima, s tim da treba vrlo ozbiljno razmišljati o obnavljanju istih.

Sve to ukazuje da je potrebno preduzimanje mera oko dovođenja puževa i cilindara u stanje, čiji se zazori kreću u granicama od 0.4 do 0.7 mm.

## LITERATURA

- [1.] Fenner, R. T., "Extruder Screw Design", London, Iliffe book LTD., 1970.
- [2.] Tadmor, Z., Klein, I. "Engineering Principles of Plasticating Extrusion", Robert E. Krieger publishing Co., Florida, 1982.

## Analysis of Wear Status of The Most Endangered Elements of The TMS Lines for The Rubber and Plastics Extrusion

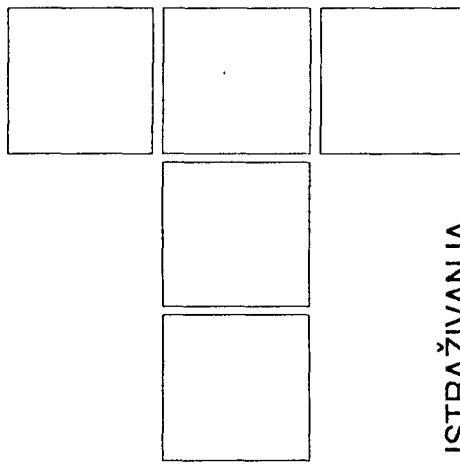
*It is well known that the central parts of every extrusion line for manufacturing the isolation and coatings on conductors and cables consist of an assembly of worm with cylinder. These assemblies, together with the extrusion material represent the Tribo Mechanic Systems (TMS) on which degree of wear depend both functionality and productivity of the extrusion equipment, as well as the quality of the extruded rubber and plastic materials.*

*By analysis of the wear status of worms at the level of the HK "CABLES" Company, we came up with the global approximate wear curve, which gives the functional relation of tolerance ( $z$ ) between the worm and the cylinder during the exploitation time ( $t$ ) expressed in years. It was established that the maximum allowed tolerance between the worm and the cylinder, with keeping the extruder quality within permissible limits, is up to 0.7 mm, at the average exploitation of the extrusion lines of about ten years.*

## Анализ состояния изношенности наиболее уязвимых элементов ТМС - линий для экструзии резины и пластмассы

Известно, что важнейшими частями каждой экструзионной линии для изготавления изолирующих покрытий и слоев проводников и кабелей, являются червячные узлы с цилиндрами. Эти узлы вместе с экструзионным материалом представляют собой трибо-механическую систему (ТМС), ощущение изношенности которой зависит от работы и производительность экструзионного оборудования, как и качество выпущенной резины и пластмассы.

Анализируя состояние изношенности червячных кривых на Заводе "КАБЛОВЫ" авторы установили общие аморфистиковые кривые изнашивания, дающие функциональную зависимость зазора ( $z$ ) между червяком и цилиндром от времени эксплуатации ( $t$ ), выраженного в годах. Установлено, что для качественного процесса экструзии, максимально допустимый зазор должен быть до 0.7 мм, при среднем времени эксплуатации линии лей десять.



# Uticaj promenljivih tribouslova na položaj krive granične deformabilnosti tankih limova pri nemonotonom deformisanju

## 1. UVOD

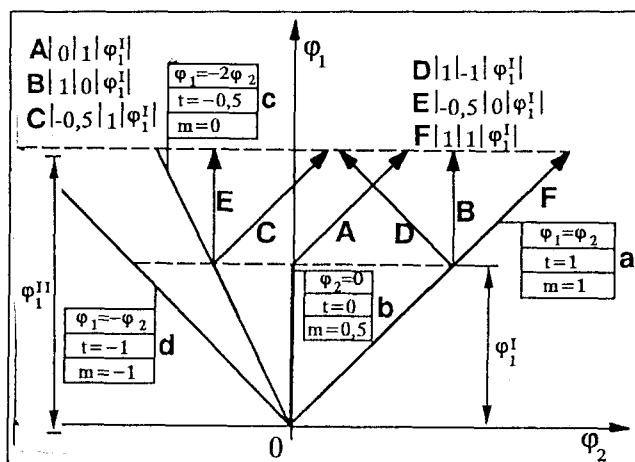
Dijagrami granične deformabilnosti (DGD) dobijaju se uglavnom u uslovima monotonog deformisanja (svaka tačka dijagrama dobija se deformisanjem po jednoj naponsko-deformacionoj shemi uz konstantnu brzinu deformacije). Višefazni postupci sa promenom naponskih shema u pojedinim fazama uzrokuju nemonotonost koja se odražava na položaj krivih DGD [1]. Promenljivi tribološki uslovi na kontaktnim površinama pri monotonom deformisanju ne dovode do promene položaja krivih DGD [2], međutim kod nemonotonih postupaka taj uticaj se zapaža što govori o velikoj osetljivosti ovakvih procesa deformisanja na promenu tribouslova.

## 2. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Realizovana su dva postupka. Prvi (shema 2) u prvoj fazi sadrži jednoosno zatezanje široke trake lima (200 mm) brzinom 20 mm/min. Time se ostvaruje putanja c sa sl. 1. Zatezanje je rađeno na hidrauličnoj kidalici WPM ZD 40 Pu (maksimalna sila 400 kN). Ostvarena je prirodna deformacija od 0.172 za komade bez podmazivanja i 0.182 za komade sa podmazivanjem. Veličina trake je tako izabrana da iz nje mogu (i posle zatezanja) da se isecaju epruvete za naredne faze deformisanja. Drugi postupak (shema 4) u prvoj fazi sadrži formiranje dvoosno zategnutog komada dovoljne veličine. Na taj način se ostvaruje putanja a sa sl. 1. Izvođenje ovakve naponske

sheme rešeno je čistim dubokim izvlačenjem po principu datom na sl. 2. Izvlače se istovremeno dva komada. Donji se koristi, a gornji je pomoći sa otvorom odgovarajućeg prečnika.

Svrha pomoćnog lima je aktivno korišćenje radijalnih sila trenja u kontaktu limova. Time se ostvaruje veći stepen deformisanja. Analogno prvom slučaju ostvarene su deformacije 0.172 i 0.182. Rađeno je brzinom deformisanja 20 mm/min na pomenutoj hidrauličnoj kidalici.

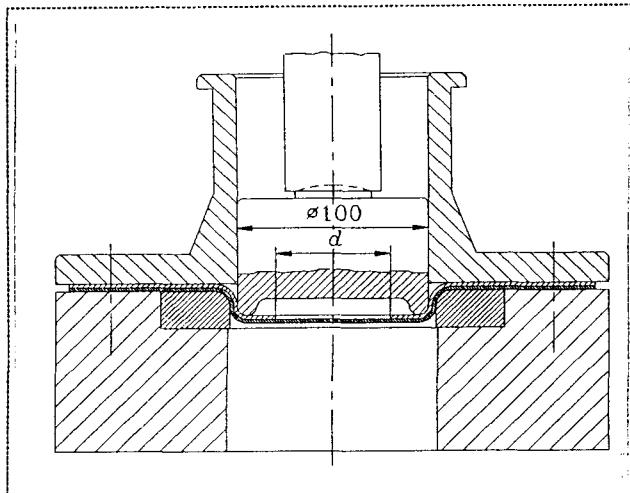


Sl. 1 Prikaz najčešće realizovanih putanja deformisanja

Materijal je lim inostrane proizvodnje St.1405 po DIN-u (približno Č0148P5 po JUS-u). Karakteristike su date u [1]. Druga faza oba postupka je razvlačenje serije od po 10 epruveta za dobijanje tačaka DGD [1, 2]. Realizovana

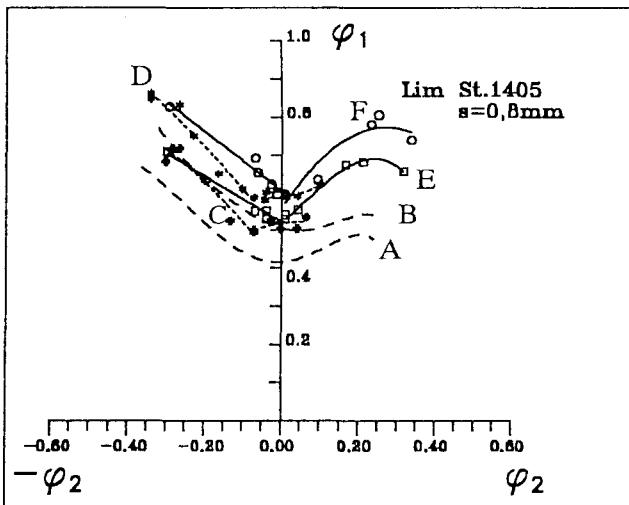
Mr Srbislav Aleksandrović, dipl. ing.,  
Mašinski fakultet Kragujevac

je na mašini ERICHSEN 142/12 (maksimalna sila 120 kN) brzinom deformisanja 15 mm/min. Prečnik polusfernog izvlakača je 50 mm.



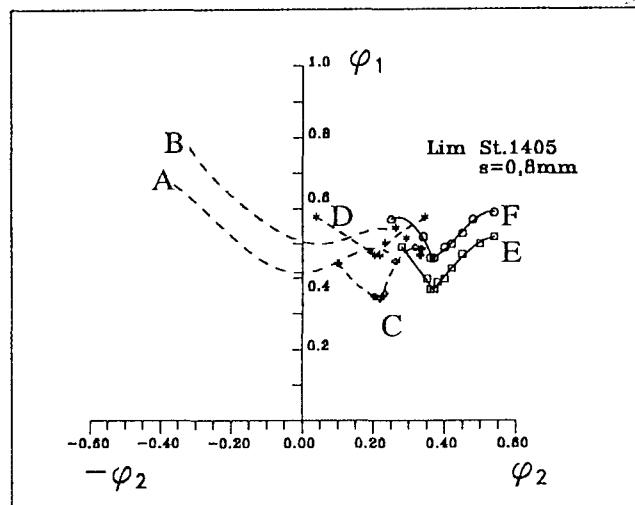
Sl. 2 Princip ostvarenja razvlačenja na dnu komada

Sl. 3 prikazuje tri para eksperimentalnih krivih. Par A,B su osnovne krive dobijene monotonim deformisanjem. Krive C i D dobijene su deformisanjem po shemi 2 u uslovima suvih površina, a krive E i F u uslovima podmazivanja uljem i folijom. Donje krive u paru odnose se na lokalizaciju, a gornje na razaranje. Primenom ulja i folije trenje u kontaktu izvlakača i lima svedeno je na najmanju meru. Zapaža se efekat porasta druge glavne deformacije, dok prva ne pokazuje veće promene. Sa smanjenjem koeficijenta trenja efekat je izraženiji.



Sl.3 Položaj DGD pri postupku po shemai 2

Na sl. 4 dato je, takođe, tri para krivih. A i B su osnovne krive kao i na sl. 3. Krive C i D pokazuju znatan uticaj nemonotonog deformisanja po shemai 4. Ovaj par se odnosi na slučaj pojačanog trenja (suve kontaktne površine). Par krivih E,F daje DGD pri smanjenom trenju (primena ulja i folije). Efekat priraštaja druge glavne deformacije uočen na sl. 3 ovde je pojačan.



Sl. 4 Položaj DGD pri postupku po shemai 4

### 3. REZULTATI TEORIJSKOG PRISTUPA I UPOREĐENJE SA EKSPERIMENTOM

Kao teorijski model ovde je korišćen tzv. quasi-teorijski pristup detaljno izložen u [1, 3, 5]. Na ovom mestu biće navedene samo konačne vrednosti graničnih deformacija. Vrednost  $\varphi_2$  biće korigovana za uočen priraštaj na eksperimentalnim krivim uzrokovanim smanjenim trenjem.

Na osnovu sledećih relacija i potrebnih podataka razvijen je program u Turbo Pascalu za dobijanje DGD. Krive se izračunavaju tačka po tačka i formiraju se dva fajla (za levu i desnu granu krive DGD). Pored podataka o samom procesu (deformacioni odnos t) treba poznavati samo debljinu lima i eksponent deformacionog ojačavanja (n-faktor). Na slikama 5 i 6 vide se korigovane krive. Prednost ovakvog pristupa je njegova jednostavnost. Granične deformacije date su relacijama:

$$\varphi_{IL(j)}^T = \varphi_i^{(1)} + f q_{(j)} \frac{(I + 1.8 \cdot s) \cdot n}{6 A_{\varphi(j)}^{(2)}} \text{ za } t_{(j)}^{(2)} > 0$$

$$\varphi_{IL(j)}^T = \varphi_i^{(1)} + f q_{(j)} \frac{(I + 1.8 \cdot s) \frac{2t_{(j)}^{(2)} + 3}{3(t_{(j)}^{(2)} + 1)} n}{6 A_{\varphi(j)}^{(2)} - 2} \text{ za } t_{(j)}^{(2)} < 0$$

$\varphi_1^{(1)}$  je deformacija na kraju prve faze procesa, a:  $t = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$

deformacioni odnos.  $t^{(1)}$  je konstantna vrednost za prvu fazu (-0.5 za shemu 2; 1 za shemu 4).  $t_{(j)}^{(2)}$  je nezavisno promenljiva (na to ukazuje indeks j) i uzima vrednosti u granicama približno -0.5 do 1. Ostale veličine imaju sledeći oblik:

$$f q_{(j)} = \frac{1 - q_a^{(1)}}{1 + f(t^{(1)} - t_{(j)}^{(2)})q_a^{(1)}}; \quad q_a^{(1)} = \frac{\varphi_i^{(1)}}{\varphi_{IL}^{(1)}}$$

$$\varphi_{IL}^{(1)} = \frac{(1+1.8 \cdot s) \cdot n}{\frac{6A_\varphi^{(1)}}{\sqrt{3}(t^{(1)}+1)} - 2} \text{ za } t^{(1)} > 0$$

$$\varphi_{IL}^{(1)} = \frac{(1+1.8 \cdot s) \frac{2t^{(1)}+3}{3(t^{(1)}+1)} n}{\frac{6A_\varphi^{(1)}}{\sqrt{3}} - 2} \text{ za } t^{(1)} < 0$$

$$\varphi_{2L(j)}^T = t^{(1)} \varphi_1^{(1)} + t_{(j)}^{(2)} (\varphi_{IL(j)}^T - \varphi_1^{(2)})$$

Vrednost  $A\varphi^{(1)}$  se dobija analogno (uzima se  $t^{(1)}$ ).

$f=3$  za  $t^{(1)}>t^{(2)}$ ;  $f=1/3$  za  $t^{(1)}<t^{(2)}$ .  $s$  je debljina lima, a  $n$  eksponent deformacionog ojačavanja (n-faktor).

Druga glavna granična deformacija izračunava se po sledećoj relaciji:

Korigovana vrednost za priraštaj druge glavne deformacije se određuje po izrazu:

$$\varphi_{2L(j)}^T = \varphi_{2L(j)}^T + \Delta\varphi_2$$

$\Delta\varphi_2$  može da se prepostavi kao kvadratna funkcija koeficijenta trenja. Ako se uzmu vrednosti za koeficijent trenja dati u [4] i funkcionalna zavisnost u obliku kvadratne parabole moguće je dobiti metodom najmanjih kva-

$$A_{\varphi(j)}^{(2)} = \sqrt{1 + t_{(j)}^{(2)} + (t_{(j)}^{(2)})^2}$$

drata priraštaj  $\Delta\varphi_2$ .

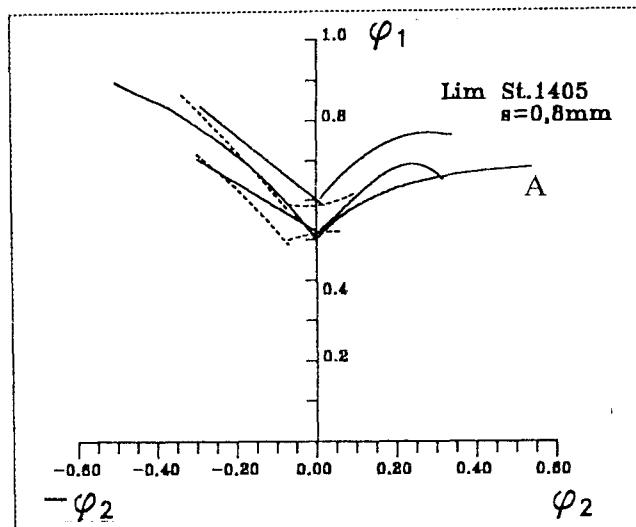
Vrednosti koeficijenta trenja su [4]:

- za suve kontaktne površine 0.14 ;
- primena ulja za duboko izvlačenje 0.1 ;
- primena plietilenske folije 0.085 ;
- primena ulja i folije 0.06.

Vrednosti priraštaja  $\Delta\varphi_2$  eksperimentalno su utvrđene za ekstremne uslove (suve površine i površine podmazane uljem i polietilenskom folijom) i vidljive su sa sl. 3 i sl. 4. Za prelazne kontaktne uslove pretpostavljene su vrednosti priraštaja 0.04 (za korišćenje plietilenske folije) i 0.06 (za primenu ulja za duboko izvlačenje). Za ove vrednosti potrebna je eksperimentalna provera koja će se obaviti tokom predstojećih istraživanja. Relacija za određivanje  $\Delta\varphi_2$  je:

$$\Delta\varphi_2 = 0.228 - 2.51\mu + 6.29\mu^2.$$

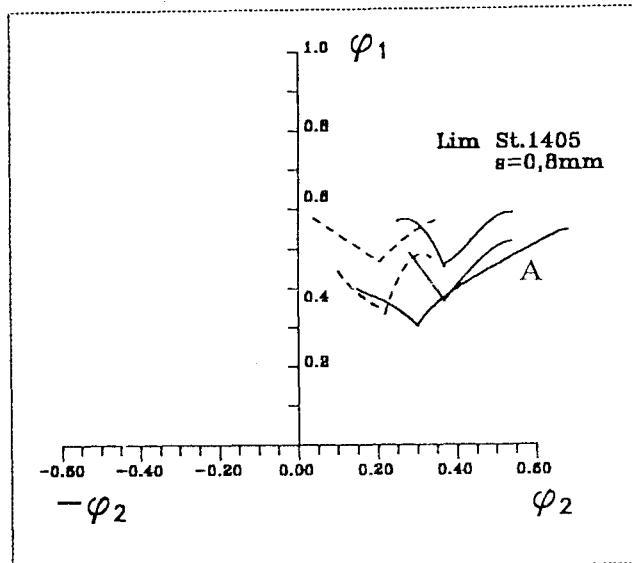
Sl. 5 prikazuje položaj teorijske krive DGD po ukratko izloženom modelu uz korekciju za iznos priraštaja druge glavne deformacije usled promenljivih tribouslova na kontaktnim površinama alata i lima. Pomenuta kriva



Sl. 5 Pložaj korigovane teorijske krive DGD po shemii 2

označena je sa A dok su ostale krive eksperimentalne (već prikazane na sl. 3 sa eksperimentalnim tačkama koje su ovde izostavljene zbog jasnoće prikaza). Kriva A se odnosi na razaranje i upoređujući njen položaj sa eksperimentalnim krivama moguće je zapaziti solidno pokapanje iako je teorijski model relativno jednostavan. Uočava se da kompletan kriva leži nešto niže od eksperimentalne što obezbeđuje zonu sigurnosti, bitnu iz praktičnih razloga. Pošto je reč o krivoj razaranja (gornjoj krivoj pojasu DGD), kako se obično predstavlja eksperimentalni DGD) bilo bi opasno očekivati da lim može da izdrži veće granične deformacije (u ovom slučaju prvu glavnu graničnu deformaciju) nego što stvarno može. Taj rizik uvek postoji ako teorijska kriva razaranja leži visoko.

Sl. 6 (analogno sl. 5) daje prikaz teorijske granične krive za shemu deformisanja 4 (kriva A). Ostale neobezležene krive su eksperimentalne. I na ovom prikazu izostavljene su eksperimentalne tačke radi preglednosti. Uožava se nešto niži položaj krive A u odnosu na pojas lokalizacije



Sl. 6 Pložaj korigovane teorijske krive DGD po shemii 4

eksperimentalnog DGD što daje nešto veću zonu sigurnosti za praktičnu primenu od potrebne. Što se tiče priraštaja  $\Delta\varphi_2$ , vidljiva je razlika između eksperimentalnih krivih i krive A. Sve ovo navodi na zaključak da triboslovni različiti uticaj na položaj DGD ako se menja tip nemonotonosti odnosno deformaciona shema. Prema tome u izrazu za priraštaj druge glavne granične deformacije treba, pored koeficijenta trenja, uvesti i odgovarajući faktor koji bi uzeo u obzir putanje u prvoj fazi deformisanja (na pr. deformacioni odnos t). Naredna ispitivanja obuhvatiće i ovo pitanje.

## 4. ZAKLJUČAK

Suštinsko objašnjenje efekata uticaja nemonotonosti procesa deformisanja na položaj krivih granične deformabilnosti pri promenljivim triboslovima leži u složenim procesima na mikro-nivou koji se dešavaju u metalnoj rešetki lima. Sa inženjerskog aspekta važniji je fenomenološki pristup koji omogućava sagledavanje zakonitosti i uticajne faktore na makro nivou. Pravilno utvrđivanje tih relacija omogućava kvalitetno rešavanje problema u tehnološkoj praksi obrade deformisanjem.

Pokušaj jednostavnog uključenja triboslova u postojeće relacije položaja krivih dijagrama granične deformabilnosti pri dvostrukim nemonotonim procesima deformisanja dao je zadovoljavajuće, ali početne rezultate koje narednim istraživanjima treba unaprediti. Prime-

njeni teorijski model sa korekcijom, u slučaju dvostrukog deformisanja kad se u prvoj fazi vrši jednoosno zatezanje (shema 2) daje zadovoljavajuće rezultate. Nešto su veća odstupanja u slučaju deformisanja po shemi 4 (u prvoj fazi dvoosno zatezanje - razvlačenje), ali su rezultati još uvek primenljivi sa praktičnog stanovišta.

## LITERATURA

- [1.] S. ALEKSANDROVIĆ: *Granična deformabilnost tankih limova u uslovima nemonotonog procesa plastičnog deformisanja*, magistarski rad, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1993.g.
- [2.] M. STEFANOVIĆ: *Tribologija dubokog izvlačenja*, Jugoslovenski komitet za tribologiju, Kragujevac, 1994.g.
- [3.] B. DEVEDŽIĆ: *Granična deformabilnost limova pri različitim istorijama deformisanja*, 24. savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Novi Sad, 1992.g.
- [4.] E. G. GUCKER: *The Analysis of Frictional Behaviour and Formability under the Conditions of the real Cup-Drawing Process*, Institut fur Fertigungstechnik, University Siegen, Germany, 1989.g.
- [5.] B. DEVEDŽIĆ, S. ALEKSANDROVIĆ: *Uticaj nemonotonosti dvostrukih procesa deformisanja na graničnu deformabilnost tankih limova*, 25. savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Beograd, 1994.g.

## Influence of The Variable Tribos - Conditions on Position of The Limiting Deformability Curve of The Thin Sheets

*The paper contains the experimental results of investigations of the tribos conditions influence on the position of the limiting deformability curve (LDC) in non - monotonous straining and a proposition of the simple empirical - analytical way for definition of the LDC position with respect to contact conditions.*

*Experiments includes two two - phase non - monotonous procedures. The first one (denoted as the schematics 2) in the first phase contains the uniaxial stretching of the thin sheet strips of the 200 mm width, while the second one (denoted as the schematics 4) the biaxial stretching realized by the special stretching tool.*

*In the second phase is the procedure of the LDC determination by stretching the series of samples with the variable thickness by the semispherical stretching tool. The influence of the tribos conditions was investigated by application of the extremal contact conditions. On one side those are the dry contact surfaces degrease by acetone, and on the other side surfaces lubricated with oil and polyethylene foil.*

## Влияние изменчивых трибологических условий на положение кривой предельной деформируемости тонкой листовой стали

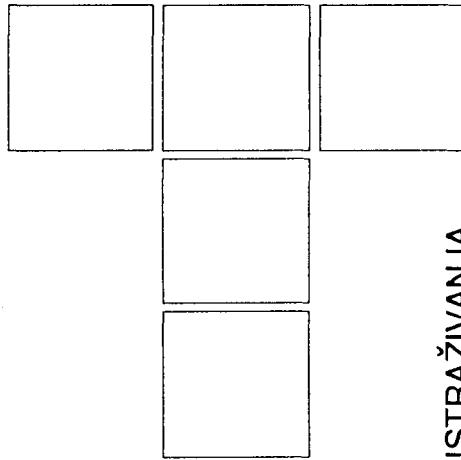
*В работе изложены результаты экспериментальных исследований влияния трибологических условий на положение кривой предельной деформируемости (ДГД) при немонотонном деформировании и предложен простой способ определения этого положения в зависимости от условий кон такта.*

*Опыт состоял из двух этапных немонотонных способов. Первый (показанный как схема 2) на первом этапе подразумевает одноосевое нагруживание листовой ленты, шириной 200 мм, в торец (схема 4) как функции двухосевое нагружение, проводимое на дне цилиндрического куска материала диаметра 100 мм, полученного глубокой вытяжкой с помощью специального приспособления.*

*На втором этапе определялось положение кривой предельной деформируемости нагружением серии образцов различной ширины полусферическим вытяжителем. Влияние трибологических условий исследовалось в экспериментальных условиях кон такта, т.е. при вполне сухих поверхностях и с применением масла и полиуретановой фольги.*

**B. JEREMIĆ, M. BABIĆ, M. MEYER,  
P. TODOROVIĆ, N. MILIĆ**

# PVD Coatings and Dynamic Processes in The Contact Zone



ISTRAŽIVANJA

## 1. INTRODUCTION

Methods for improving the tribological characteristics of the tribomechanic elements contact surfaces are based on deposition of thin coatings (TiN, TiAlN, TiCN, ZrN, HfN, CrN, ...) onto the base material. One of the procedures is based on *Physical Deposition from the Vapor Phase*, or the PVD (*Physical Vapor Deposition*). By this procedure onto the base material one deposits the thin coating which is expected to have high resistance to wear and low friction coefficient.

In this paper are considered coatings of TiN, TiAlN, TiCN and ZrN obtained by the PVD procedure, and they were compared with the uncoated steel Č5420. The dynamic component of the friction force was observed. Description and quantification of dynamic processes in the contact zone was done by the *coefficient of dynamic behavior*  $K_d$ , while the analysis of the friction force dynamic component content was done by the *power spectrum*.

All the investigations were done in the Laboratory for Tribology at Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac, within the framework of the project E 1112, which is financially supported by the Ministry for Science and Technology of Republic of Serbia.

## 2. TESTING PROGRAM

By the testing program it was predicted to measure the friction force (continuously over the certain time interval), i.e., their dynamic components as a function of materials of the contact elements, sliding speed, and present quantity of lubricant in the contact zone.

## 3. TESTING CONDITIONS

The sliding speed was varied from 0.8 to 2.0 m/s (with the step of 0.4 m/s) at constant normal force  $F_n = 2.5 \text{ daN}$ . All the measurements were done for the case of dry and lubricated contact surfaces (lubrication was done by felt dipped into oil). The lubrication oil was WAY LUBRICANT 32.

Contact pair consists of two disks (contact "disk on disk") what is shown in Figure 1. Contact between them was along a line of the 8 mm length (theoretical idealization).

The moving disk was made of steel Č5420 (cemented at  $f=1 \div 1.2 \text{ mm}$ , then ground, of 62 HRC hardness). Five fixed disks were used, that were made of:

- Č5420 cemented at  $f=1 \div 1.2 \text{ mm}$ , then ground, with hardness 58 HRC,
- Č5420 cemented, then coated with the TiN coating applied by the arc procedure,
- Č1430 annealed, then coated with the TiAlN coating applied by the arc procedure,
- Č5420 cemented, then coated with the ZrN coating applied by the arc procedure,
- Č4730 annealed, then coated with the TiCN coating applied by the ion plating procedure.

By the system of levers and weights the normal force  $F_n$  is being dosed. The friction variator applies the number of rotations of the shaft that carries the moving disk, what causes the variation of the sliding speed.

---

Prof. dr Branislav Jeremić, dipl.ing.  
Prof. dr Miroslav Babić, dipl.ing.,

Mr Nenad Milić, dipl. ing.

Petar Todorović, dipl. ing., Faculty of Mechanical  
Engineering, Kragujevac

Prof. dr Mark Meyer, dipl. ing., College of DuPage, USA

## 4. MEASUREMENTS SETUP

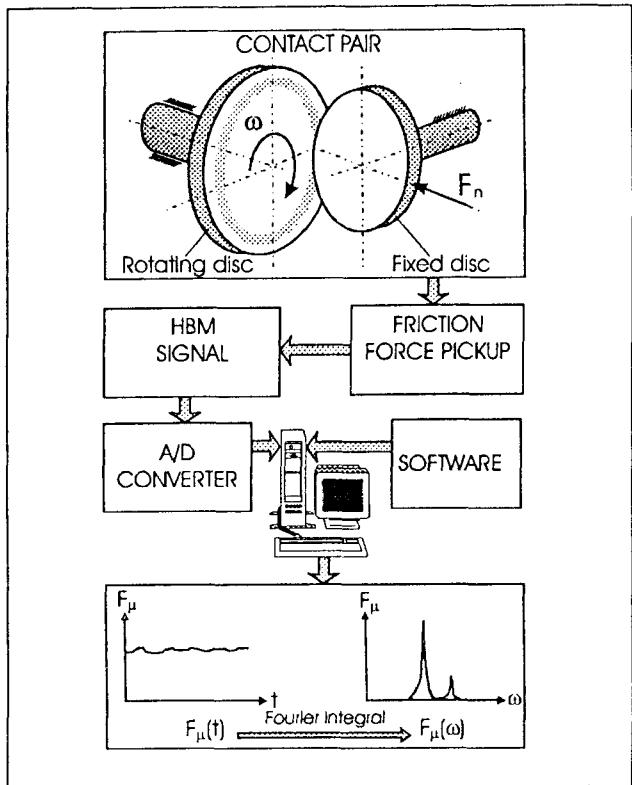


Fig. 1.

Geometry of contact realization ("disk on disk"), as well as the components of the measurements setup are given in Figure 1. The friction force signal which is obtained from the strain gauges is being led into the HBM signal amplifier, and then into the AD converter which is built into the PC. In the PC, with help of the adequate software, the processing and storage is being done of the recorded signals that carry information about the friction force.

By previous measurements was established that in the signal there are no friction force components above  $f_m = 200 \text{ Hz}$  (apart from the noise of the measurements setup, which is negligible). The sampling period  $\Delta t$  was chosen in accordance with the sampling theorem which states, [4]: if the continuous time function  $f(t)$  has the spectrum which is in the interval of frequencies 0 to  $f_m$ , then that function is completely defined by its instantaneous values taken in equidistant point that form a series on the abscissa, with intervals between the terms of the series equal to:

$$\Delta t = \frac{1}{2 \cdot f_m}$$

For practical applications the sampling period is being chosen in such a way that it satisfies the inequality:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2 \cdot f_m} = \frac{1}{2 \cdot 200} \rightarrow \Delta t \leq 2.5 \cdot 10^{-3}$$

In performing the experiment the sampling period was chosen of  $t = 10^{-3} \text{ s}$  (what corresponds to discretization frequency of 1000 Hz. The length of the recorded signal was 4 s, i.e., 4 000 points).

## 5. CRITERIA FOR EVALUATION OF DYNAMIC PROCESSES IN THE CONTACT ZONE

For quantification of dynamic processes in the contact zone we introduced the coefficient of dynamic behavior  $K_d$  which represents the ratio of effective value of the friction force dynamic component to the average value of the friction force (Figure 2):

$$K_d = \frac{\Delta F_{\mu \text{eff}}}{\bar{F}_{\mu}}$$

Figure 2 represents the idealized form of the friction force recording for the contact realization geometry shown in Figure 1, where the dynamic component of the friction force comes from the fact that the plane of the moving disk is not perpendicular to the rotation axis. Real recording of the friction force contains in it also some other influences, where some of them have characteristics of the stochastic process (vibrations that arise from the driving motor, friction variator, measurements setup noise, ...).

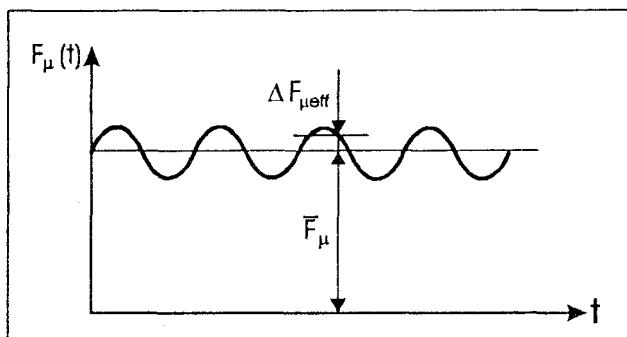


Fig. 2.

Apart from the dynamic behavior coefficient  $K_d$  which represents the ratio of the dynamic and static components of the friction force, it was necessary to determine the structure of the friction force dynamic component. Due to that it was necessary to transform the friction force dynamic component from the time domain into the frequency domain. This was done by the Fourier integral which reads:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt$$

and which resolves the time function  $f(t)$  into the continuous spectrum in the frequency domain. The function  $F(j\omega)$  is called the amplitude spectral density.

In the paper, for the analysis of the friction force dynamic component content, we used *the energy spectral density (power spectrum)* which is defined as a product of the complex conjugate values  $F(j\omega)$  and  $F^*(j\omega)$ :

$$S(\omega) = F(j\omega) \cdot F^*(j\omega) = |F(j\omega)|^2$$

## 6. TESTING RESULTS

In Figure 3 is shown the recording of the friction force in the time domain.

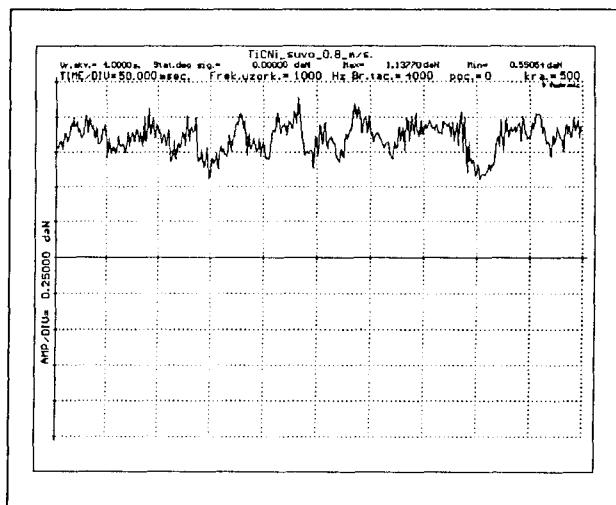


Fig. 3. Typical form of the friction force in the time domain.

In Figures 4÷8 are shown the power spectra of the friction force for all the fixed disks at the sliding speed of 1.6 m/s for the case of dry contact surfaces. All the measurements were repeated at least three times so the presented diagrams are only the typical representatives.

The most dominant frequency in all the spectra is the rotation frequency of the rotating disk of  $450 \text{ min}^{-1}$ , what amounts to 7.5 Hz. Other characteristic frequencies are mainly its higher harmonics. Resonant frequency of the

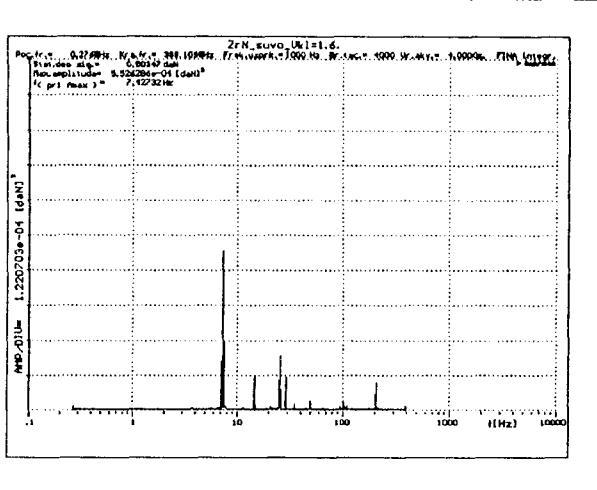


Fig. 5. The friction force power spectrum for the case of dry contact surfaces, fixed disk is with the ZrN coating,  $V_{sl} = 1.6 \text{ m/s}$

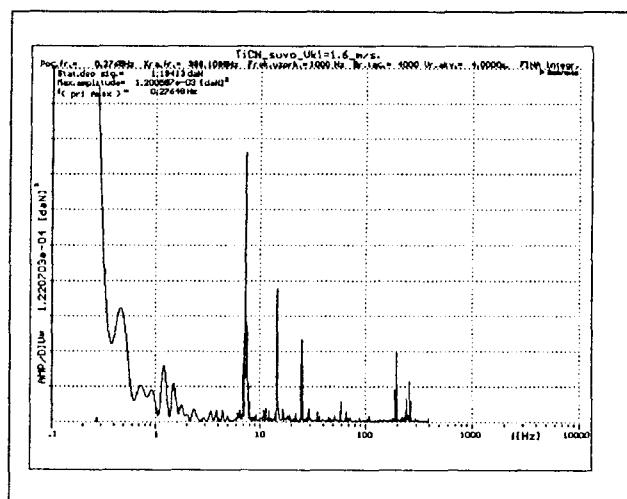


Fig. 6. The friction force power spectrum for the case of dry contact surfaces, fixed disk is with the TiCN coating,  $V_{sl} = 1.6 \text{ m/s}$

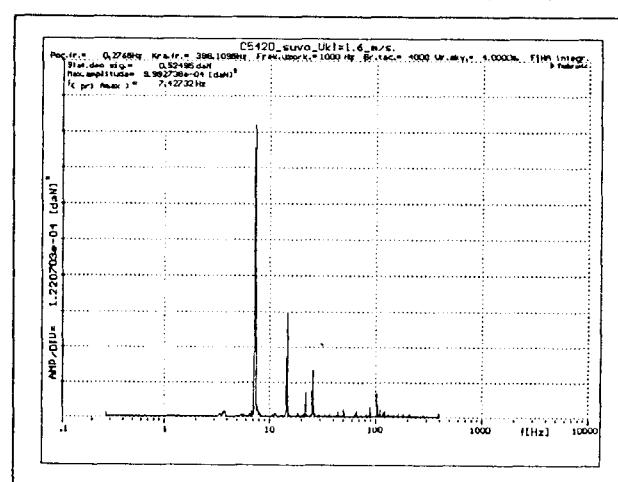


Fig. 4. The friction force power spectrum for the case of dry contact surfaces, fixed disk is made of C5420,  $V_{sl} = 1.6 \text{ m/s}$

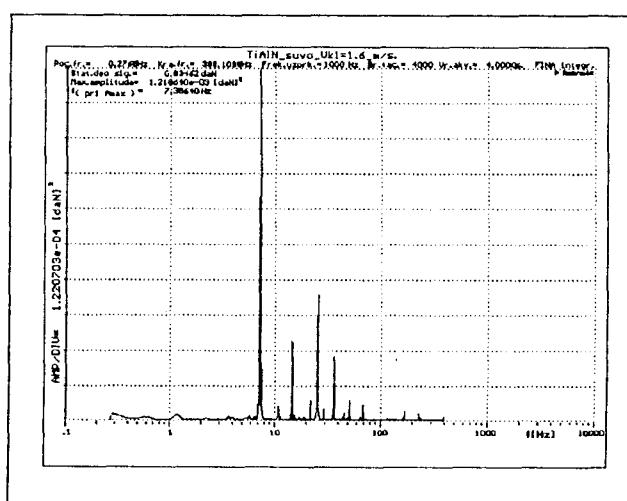


Fig. 7. The friction force power spectrum for the case of dry contact surfaces, fixed disk is with the TiAlN coating,  $V_{sl} = 1.6 \text{ m/s}$

and for the case of the boundary lubrication are given in Figures 9 and 10, respectively 11 and 12.

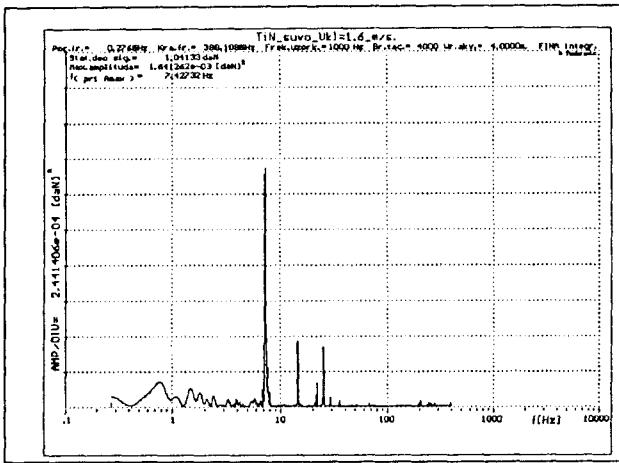


Fig. 8. The friction force power spectrum for the case of dry contact surfaces, fixed disk is with the TiN coating,  $V_{sl} = 1.6 \text{ m/s}$

friction force measurements system is 200 Hz, so that component is also present in spectra.

Recalculations of the amplitudes that were read off the power spectra diagrams  $A^*$  into the real values of amplitudes  $A$  from the time domain is done with help of formula:

$$A = 2 \cdot \sqrt{A^*}$$

Values of the friction coefficient  $\mu$  and the coefficient of dynamic behavior  $K_d$  for the case of dry contact surfaces,

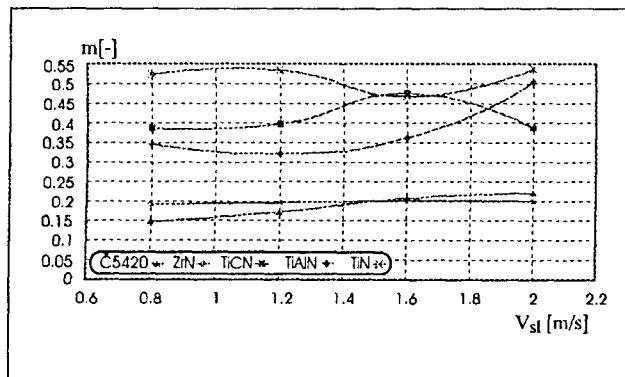


Fig. 9. Friction coefficient for the case of dry contact surfaces

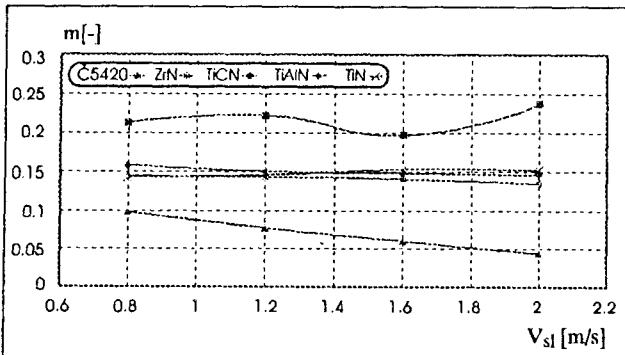


Fig. 10. Friction coefficient for the case of boundary lubrication

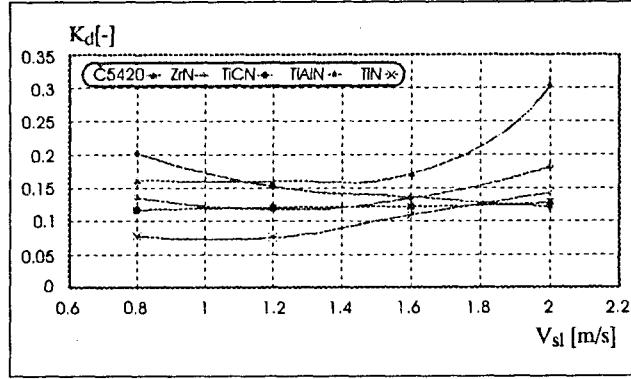


Fig. 11. The coefficient of dynamic behavior for the case of dry contact surfaces

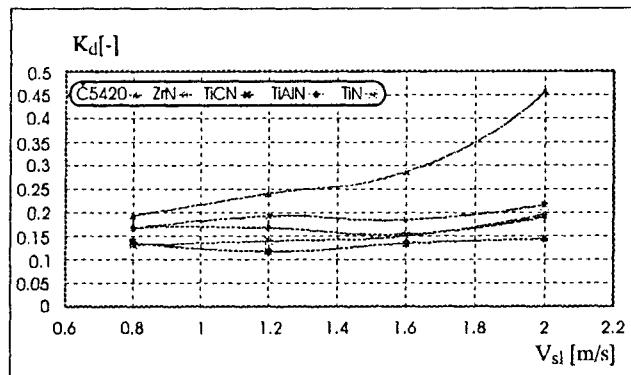


Fig. 12. The coefficient of dynamic behavior for the case of boundary lubrication

## 7. CONCLUSION

By analyzing the experimental results one can come to the following conclusions:

- For the case of the dry contact surfaces the friction coefficient is the smallest for steel Č5420 up to sliding speeds of 1.5 m/s, while for the sliding speeds 1.5 m/s the smallest friction coefficient has the disk with the ZrN coating. Other disks have significantly larger friction coefficients than the Č5420 steel.
- In the case of boundary lubrication the smallest friction coefficient has the disk made of Č5420 with the decreasing tendency with the speed increase. Disks with the ZrN, TiAlN and TiN coatings have approximately the same and almost constant value of the friction coefficient in the whole observed range of speeds. The largest friction coefficient has the disk with the TiCN coating.
- The friction coefficient of the disk with the ZrN coating is almost the same for both the case of dry contact surfaces and case of boundary lubrication. It can be said that for this coating the lubricant, as the third element of the tribomechanic system, has no influence whatsoever on its tribological behavior.

- When the coefficient of dynamic behavior  $K_d$  is observed, it is noticed that at higher sliding speeds it is the largest for the case of sliding the steel over steel, namely, it has the greatest tendency of increase both for the case of dry contact surfaces and the case of boundary lubrication.
- The coefficient of dynamic behavior  $K_d$  is, for the case of boundary lubrication, changing within the small limits, and is approximately constant.

## REFERENCES

- [1.] JEREMIĆ, B., Contribution to studying the influence of dynamic loading on the friction process in tribomechanic systems, Doctoral dissertation, Faculty of Mechanical Engineering, Kragujevac, April 1987.
- [2.] BABIĆ, M., Contribution to investigation of tribological properties of contact layers through development of tribometry, Doctoral dissertation, Faculty of Mechanical Engineering, Kragujevac, January 1989.
- [3.] TODOROVIĆ, P., Technical diagnostics of tribomechanic systems through their oscillatory behavior, Diploma thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Kragujevac, June 1994.
- [4.] STOJANOVIĆ, I. S., Fundamentals of telecommunications, Civil engineering book, Belgrade, 1981.

## PVD prevlak i dinamički procesi u zoni kontakta

*U cilju smanjenja rasipanja materijala i energije u procesima trenja i habanja primenjuje se više različitih postupaka modifikacije kontaktnih površina tribomehaničkih elemenata. Osim povećanja veka trajanja kontaktnih elemenata, ovo dovodi i do uštede zbog zamene visokokvalitetnih materijala manje kvalitetnim i jeftinijim materijalima sa modifikovanim kontaktnim površinama.*

*Rezultati istraživanja ukazuju da dinamički procesi u zoni kontakta zavise od prisutne količine maziva i vrste materijala kontaktnih elemenata, odnosno prevlaka dobijenih PVD postupkom.*

## ПВД покрытия и динамические процессы в зоне контакта

*С целью понижения расхода материала и энергии в процессах трения и изнашивания используются различные способы модифицирования трущихся поверхностей трибомеханических деталей. Кроме повышения срока службы контактных элементов, это приводит к экономии из-за замены высококачественных материалов менее качественными и более дешевыми с модифицированными трущимися поверхностями.*

*Результаты исследования показывают, что динамические процессы в зоне контакта зависят от присущего количества смазки и вида материала контактных элементов, т.е. покрытий, наносимых способом ПВД.*

R. MITROVIĆ, N. VOJKOVIĆ

# Kapacitet linija za ekstruziju gume i plastike kao funkcije pohabanosti elemenata TMS

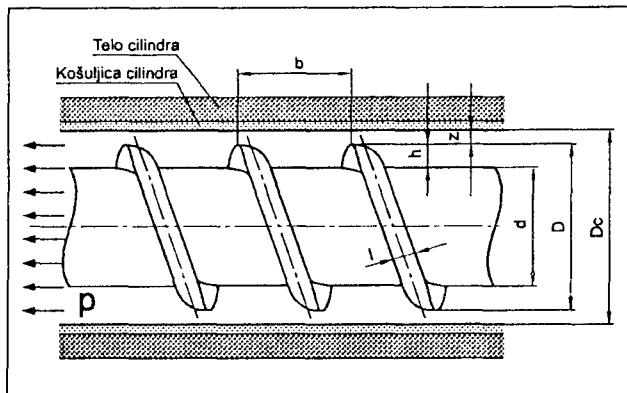
## 1. UVOD

Radijalni zazor ( $z$ ) između cilindra i puža, kao najbitnijih elemenata tribomehaničkog sistema, TMS-a, ekstruzijskih linija, predstavlja jednu od promenljivih koja značajno utiče na performanse ekstrudera, pa je u tom smislu važno proučiti efekte tog uticaja. Ovo je naročito važno ako se zna da se vremenom, tokom eksploracije ekstruzijskih linija, zazor između cilindra i puža povećava usled njihovog habanja.

Da bi se izbeglo trenje metalnih površina kod elemenata TMS-a, cilindar-puž, između ovih elemenata postoji funkcionalni zazor. Taj zazor se nalazi između temena zavojnice puža i unutrašnje površine cilindra, kako je to prikazano na slici 1.

Minimalni zazor mora da omogući termičke dilatacije i spreči koliziju elemenata sistema cilindar-puž. Rastop polimera se u ovom zazoru praktično ponaša kao sredstvo za podmazivanje. Kako se tokom eksploracije ekstruzijskih linija, zbog prisutnog habanja, zazor između cilindra i puža povećava, to uticaj ovog zazora na performanse ekstrudera može da nadmaši granice prihvatljivosti funkcionisanja ekstrudera.

U radu je predstavljena analiza uticaja porasta radijalnog zazora na proizvodnost ekstrudera, brzinutopljenja po-



Sl. 1. Osnovna geometrija ekstrudera

limera u ekstruderu, kašnjenje početkatopljenja polimera u ekstruderu, srednju temperaturu rastopa polimera u filmu i kvaliteta ekstrudata kao grupe faktora koji pored ostalih značajno utiču na proizvodnost linije.

## 2. UTICAJ RADIJALNOG ZAZORA NA KAPACITET EKSTRUADERA

Usled postojanja pritiska ( $p$ ) u kanalu puža ekstrudera dolazi do strujanja rastopa polimera kroz zazor između cilindra i puža. Ovo strujanje je usmereno nasuprot strujanju materijala ka matrici ekstrudera (izlasku iz ekstrudera) te u određenoj meri umanjuje kapacitet ekstrudera. Sa porastom radijalnog zazora ( $z$ ) pritisak u međuprostoru puža i cilindra opada, što prouzrokuje i pad kapaciteta ekstruzione linije.

Prof. dr Ratko Mitrović, dipl. ing., Mašinski fakultet, Kragujevac  
Mr Nikola Vojković, dipl. ing., DD "INSTITUT - FKS", HK "KABLOVT", Jagodina

Imajući u vidu gore navedeno kao i uvođenje određenih aproksimacija da bi se mogla dobiti rešenja za ovako složen sistem, kapacitet ekstrudera ili zapreminski protok Q dat je izrazom:

$$Q = n \frac{V_{bz} WH}{2} \left(1 - \frac{z}{H}\right) + n \frac{WH^3}{12\mu} \left(-\frac{\partial p}{\partial z}\right) (1+f)$$

gde je:

$$f = \left(\frac{z}{H}\right)^3 \frac{e \mu}{W \mu_f} + \frac{\left(1 + \frac{e}{W}\right) \left(-\frac{Q_D}{Q_P} + \frac{1+e/W}{tg^2 \theta}\right)}{1 + \frac{\mu_f}{\mu} \left(\frac{H}{z}\right)^3 \frac{e}{W}}$$

gde su:

- e - širina zavojnice kabala puža normalno na zidove kabala puža, cm,
- n - broj paralelnih kanala puža,
- H - dubina kanala puža, cm,
- Q - zapreminski protok ekstrudera (kapacitet ekstrudera),  $\text{cm}^3/\text{s}$ ,
- $Q_D$  - zapreminski protok vučnog strujanja,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ,
- $Q_P$  - zapreminski protok uspornog strujanja,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ,
- p - pritisak, dPa,
- $V_{bz}$  - komponenta brzine  $V_b$  u pravcu z-ose izabranog koordinatnog sistema, cm/s,
- W - širina kanala puža normalno na zidove kanala puža, cm,
- $\delta$  - debljina filma između unutrašnje površine cilindra i čvrste faze, cm,
- z - radijalni zazor, radikalno rastojanje između vrha zavojnice puža i unutrašnje površine cilindra, cm,
- $\mu$  - viskozitet rastopa polimera, g/cm s,
- $\mu_f$  - srednja vrednost viskoziteta rastopa polimera u zazoru, g/cm s.

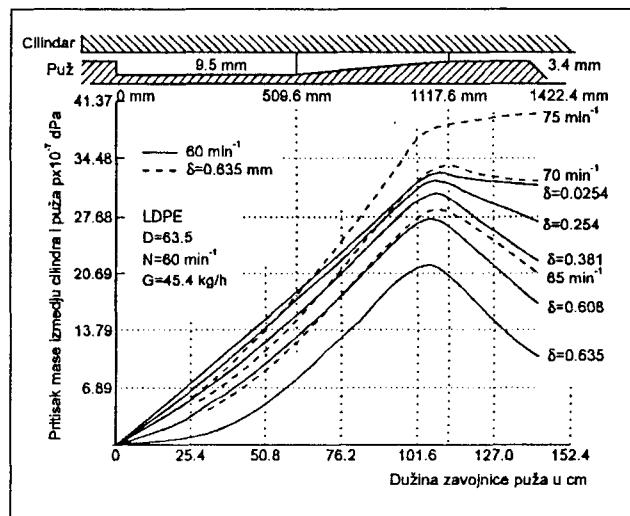
Zbog postojanja zazora izrazi za vučno i usporno strujanje ( $Q_D$  i  $Q_P$ ) su korigovani za faktore  $(1-z/H)$  odnosno  $(1+f)$  respektivno. Ukoliko je zazor između cilindra i puža veći utoliko se ima veće smanjanje kapaciteta ekstrudera pri čemu je uticaj zazora na vučno strujanje više izraženo u odnosu na usporno strujanje.

Na bazi ovoga Maddock (4) je izveo zaključak da se kao grubo pravilo može uzeti da kada zazor usled habanja dostigne vrednost od 15% od vrednosti dubine kanala puža, tada puž treba zameniti.

Barr i Chung (5) su eksperimentalno pokazali ekstrudovanjem HDPE na 63.5 mm ekstruderu,  $L/D=30$  za tri vrednosti zazora puža ( $z=0.0635$  mm,  $z=0.14$  mm,  $z=0.27$  mm), da se kapacitet ekstrudera smanjuje sa povećanjem zazora kao što je i očekivano pri čemu su preostali uslovi ekstrudovanja ostali nepromjenjeni.

Uticaj zazora na performanse 63.5 mm ekstrudera je ispitana serijom simulacija na kompjuteru. Simuliran je

proces ekstrudovanja LDPE za brzinu puža od  $60 \text{ min}^{-1}$ , kapacitet ekstrudera od  $45.4 \text{ kg/h}$  i geometriju puža (metering type screw) koja je prikazana na slici 2.



Sl. 2. Uticaj zazora na promenu pritiska za LDPE ekstrudovan na 63.5 mm ekstruderu,  $G=45.4 \text{ kg/h}$  i  $n=60 \text{ min}^{-1}$

Pune linije na slici 2 predstavljaju krive pritiska za opisane uslove ekstrudovanja i za radikalne zazore između 0.0254 do 0.635 mm. Sa slike 2 se vidi da se sa porastom zazora od 0.0254 mm do 0.635 mm pritisak smanjuje. U normalnom radu, manji izlazni pritisak (pritisak rastopa polimera na kraju odmerne zone puža) uslovjava manji pad pritika kroz matricu ekstrudera što neposredno vodi ka smanjenju kapaciteta ekstrudera.

Da bi se kompenzovao ovaj gubitak kapaciteta neophodno je povećati broj obrtaja puža (n). Isprekidane linije na slici 2, predstavljaju krive pritiska za povećane brojeve obrtaja puža sa  $60$  na  $70$  i  $75 \text{ min}^{-1}$  pri maksimalnom zazoru pohabanog puža od 0.635 mm i kapaciteta ekstrudera od  $45.4 \text{ kg/h}$  (kapacitet nepohabanog puža). Jasno se vidi da se sa aspekta "izlaznog" pritiska polimera gubitak u kapacitetu ekstrudera, koji je nastao usled porasta radikalnog zazora puža, može nadoknaditi povećavajući broj obrtaja puža sa  $60 \text{ min}^{-1}$  na  $70 \text{ min}^{-1}$ . Sa daljim povećanjem radikalnog zazora, povećanje broja obrtaja puža u cilju nadoknade kapaciteta ekstrudera, narušava kvalitet ekstrudata pa je neophodna intervencija na elementima TMS-a u cilju smanjenja ovog vitalnog zazora.

Izlazna temperatura ekstrudata znatno varira sa povećanjem zazora između cilindra i puža obzirom da je ovo u direktnoj srazmeri sa sadržajem određene količine nerastopljenog polimera u ekstrudatu odnosno nedovoljne temperaturne homogenizacije ekstrudata (hladna mesta) što sa aspekta kvaliteta ekstrudata pretstavlja nepovoljnu okolnost.

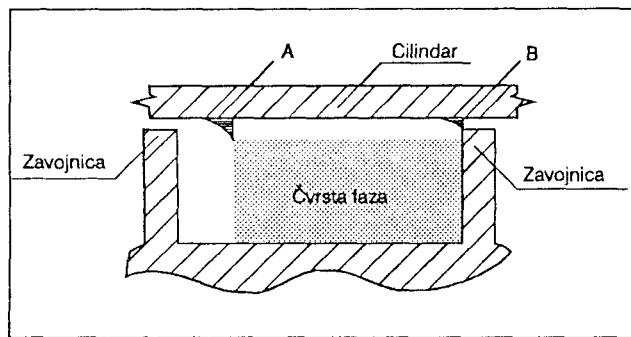
Laboratorijski eksperimenti koji su izvedeni paralelno sa simulacijama na kompjuteru pokazuju čak još više izra-

žen štetan uticaj porasta zazora nego što je simulacijama pretstavljen.

### 3. UTICAJ RADIJALNOG ZAZORA NA BRZINU TOPLJENJA POLIMERA

Brzina topljenja polimera u kanalu puža jednopužnog ekstrudera predstavlja jedan od najvažnijih parametara ekstruzinog sistema koji ima neposredan uticaj na kvalitet ekstrudata, a time na proizvodnost linije u celini.

Analiza uticaja zazora na brzinu topljenja polimera ukazuje da se usled strujanja rastopa polimera kroz zazor između cilindra i puža (tačka B, slika 3) pre svega menja maseni bilans u filmu. Ova dodatna količina materijala mora da se oduzme od količine materijala koja napusta film i odlazi u deo kanala puža gde se skuplja rastop ploimera (melt pool).



Sl. 3. Idealizovan presek kanala puža gde je prikazano strujanje rastopa polimera u radijalnom zazoru (tačka B)

Ovaj dodatni protok rastopa polimera se mora uključiti u maseni bilans u filmu.

Na bazi gore navedenog ima se:

$$Q_x = \frac{\delta V_{bx}}{2} U_2 - \frac{z V_{bx}}{2} = \frac{\delta V_{bx}}{2} (U_2 - z/\delta)$$

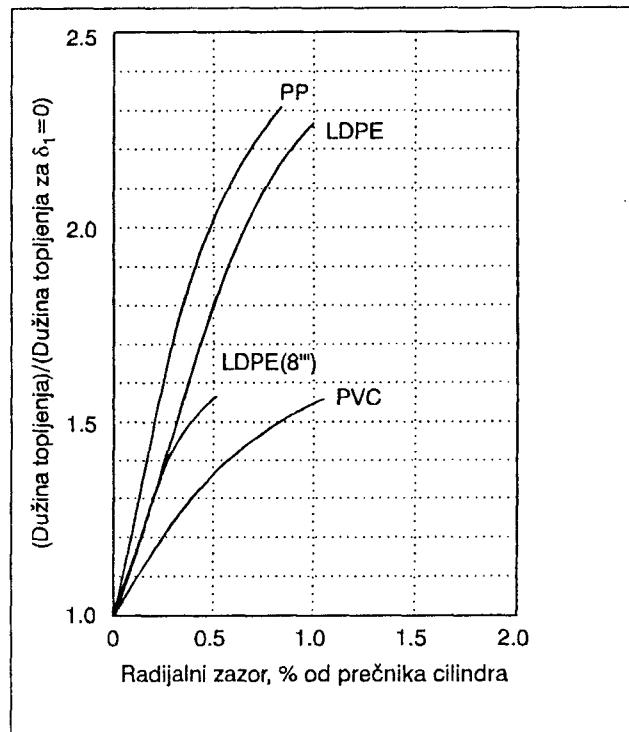
gde je:

$Q_x$  - zapreminski protok rastopa polimera iz filma po jedinici dužine u pravcu x- ose izabranih koordinatnog sistema,  $\text{cm}^3/\text{s}$ .

U jednačine za određivanje brzine topljenja polimera  $U_2$  se mora zameniti sa izrazom ( $U_2 - z/\delta$ ) gde se vidi da će brzina topljenja polimera biti manja. Na bazi ovoga sledi da održavanje malog radijalnog zazorapovećava brzinu topljenja polimera što sa aspekta kvaliteta ekstrudata predstavlja dobitak. Ovo je prizazano na slici 4.

Na slici 4 se jasno uočava štetan efekat porasta zazora na topljenje materijala u smislu da sa porastom zazora raste i potrebna dužina zone topljenja da bi se dati polimer preveo u rastop (potpuno rastopio). Ovim je jasno ukazano da efekat porasta zazora utiče na kvalitet ekstrudata. Ovaj rezultat je posebno koristan kod predviđanja

performansi ekstrudera u budućnosti posle znatnog habanja puža.



Sl. 4. Krive uticaja zazora na dužinu topljenja polimera u ekstrudera dobijene simulacijom na kompjuteru

Dodatan štetan efekat uticaja porasta zazora puža na brzinu topljenja polimera u ekstrudera (potrebnu dužinu zone topljenja) koji nije ovde istaknut, a sastoji se u kašnjenju početka topljenja materijala. Što se materijal počne kasnije topiti to će se i topljenje materijala kasnije i završiti.

"Efekat zazora" se takođe mora uzeti u obzir prilikom određivanja srednje temperature  $T_{AV}$ , do koje se rastopljeni polimer u filmu mora zagrejati. Srednja temperatura se može izračunati iz izraza:

$$T_{AV} = \frac{\int_{0}^{\delta-z} V_j T dy}{\int_{0}^{\delta-z} V_j dy}$$

gde su:

$V_j$  - komponenta brzine u j - pravcu,  $\text{cm}/\text{s}$ ,  
 $T$  - temperatura,  $^{\circ}\text{C}$ ,  
 $T_{AV}$  - srednja temperatura rastopa polimera u filmu,  $^{\circ}\text{C}$ .

### 4. ZAKLJUČAK

Izložena analiza uticaja porasta radijalnog zazora između cilindra i puža nastalog habanjem puža tokom eksploracije na performanse ekstrudera ukazuje da je taj uticaj štetan. Pokazano je da je taj uticaj štetan sa

aspekta pada kapaciteta ekstrudera (pad proizvodnosti linije) kao i sa aspekta smanjenja brzine topljenja polimera što se direktno odražava na kvalitet ekstrudata.

Na bazi ovoga se jasno uočava da je neophodno pratiti i održavati zazor u prihvativim granicama kako se ne bi narušile perfomance ekstrudera odnosno ekstruzione linije.

## LITERATURA

1. BERNHARDT, E. C., *Processing of thermoplastic materials*, New York, Reinhold publishing Co., 1962
2. FENNER, R. T., *Extruder screw design*, London, Iliffe book LTD., 1970.
3. Z.TADMOR, I. KLEIN., *Engineering principles of plasticating extrusion*, Robert E. Krieger publishing Co., Florida, 1982.
4. MADDOCK, B.H., *SPE Journal*, 15, 433, 1959
5. BARR, R. A., CHUNG, C. I., *SPE Journal*, 22, 71, 1966.

## Capacity of The Rubber and Plastics Extrusion Lines as a Function of The TMS Elements Wear

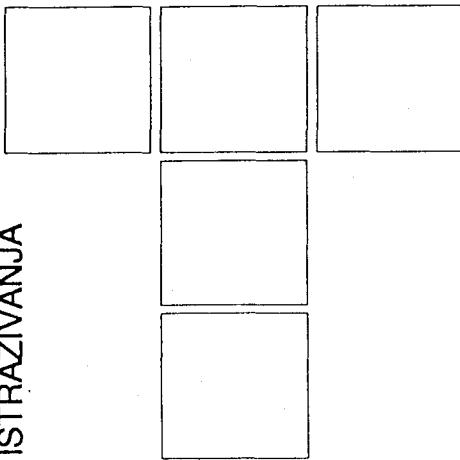
*Radial tolerance between the cylinder and worm, as the two most important elements of the tribo - mechanic system (TMS) of the extrusion lines, represents one of the variables which significantly influences the extruder performances, so in that sense, it is important to study effects of that influence. This is particularly important if one knows that in the course of time, during the extrusion lines exploitation, the tolerance between the cylinder and the worm increases due to their wear.*

*This paper presents an analysis of influence of the radial tolerance increase on the extruder productivity, the rate of the polymer melting in the extruder, delay of the polymer melting in the extruder, average temperature of the polymer melt in the film, and quality of the extrudent, as a group of factors which, besides the others, significantly influence the line productivity.*

## Производительность линии для экструзии резины и пластмассы в качестве функции изношенности деталей трибо-механической системы

Радиальный зазор между цилиндром и червяком, являющимися важнейшими элементами трибомеханической системы (ТМС), экструзионных линий, представляет собой одну из переменных, оказывающих большое воздействие на производственные возможности экструдеров, в результате чего необходимо изучение эффектов этого воздействия. Это особенно важно если учесть факт, что в процессе эксплуатации зазор этого повышается со временем вследствие изнашивания.

В настоящей работе показан анализ воздействия повышающегося радиального зазора на производительность экструдеров, скоростьплавления полимеров, охлаждение начала их плавления и среднюю температуру в фильме. Кроме того изучено и качество экструдеров, являющееся одним из факторов, значительно определяющих производительность линий.



*S. MARKOVIĆ, D. JOSIFOVIĆ*

# Uštede u materijalu i troškovima obrade pohabanih zupčanika metodom regeneracije

## 1. UVOD

Zupčanici su mašinski elementi sa veoma širokom primenom u mašinstvu. Od njihove otpornosti na habanje i čvrstoće u znatnoj meri zavise vek trajanja i pouzdanost mašina i mehanizama. Zupčanici se izrađuju od različitih materijala u raznim geometrijskim oblicima i dimenzijama, raznovrsnim metodama izrade, rade u različitim eksploatacionim režimima, pa je i njihova regeneracija kompleksna.

Na zupčanicima u toku eksploatacije nastaju raznovrsna oštećenja, kao što su: pohabanost radnih površina, mehanička oštećenja, deformacije oblika i dimenzija, prskotine, lomovi i druga. Većina zupčanika izašlih iz eksploatacije može se uspešno i pouzdano regenerisati. Pod regeneracijom oštećenih zupčanika podrazumeva se takav redosled tehnoloških operacija, koji ima za cilj povratak njihovih izgubljenih radnih karakteristika. Regeneracijom se moraju obezbediti nazivne mere i zahtevani kvalitet obrade površina, kao i pravilan geometrijski oblik i očuvanje (ili čak poboljšanje) osnovnih mehaničkih karakteristika materijala regenerisanog zupčanika. Da bi se sve ovo uspešno ostvarilo neophodno je dobro poznavanje: uzroka koji izazivaju oštećenja, karakteristika nastalih oštećenja i njihovih dimenzija, metoda za utvrđivanje oštećenja, opreme za regeneraciju, osnovnih tehnoloških i fizičko-mehaničkih karakteristika metalnih slojeva koji se nanose na oštećene površine i drugih parametara.

---

*Svetislav Lj. Marković, Tehničko-remontni zavod Čačak  
Prof. dr Danica Josifović, dipl. ing., Mašinski fakultet Kragujevac*

## 2. UZROCI I KARAKTER

### EKSPLOATACIONIH OŠTEĆENJA ZUPČANIKA

Osnovni vidovi razaranja i oštećenja, u zavisnosti od uslova u kojima rade zupčanici, njihovih konstruktivnih i tehnoloških parametara, mogu biti:

- lom zubaca,
- zamorno krunjenje radnih površina zubaca,
- abrazivno habanje,
- zadiranje ili zajedanje,
- plastično deformisanje površinskih slojeva materijala,
- oštećenja čela zubaca.

Izučavanje osnovnih vidova i uzroka razaranja zupčanika pokazalo je da iz pogona mnogo češće ispadaju pogonski zupčanici nego gonjeni. Obično su u mašinama lomu izložena dva-tri para zupčanika, koji su i po proračunu slabi članovi mašinskog sistema.

Lom zubaca izaziva iznenadno narušavanje radne sposobnosti mehanizma i cele mašine. On najčešće nastaje usled stvaranja zamornih prskotina u korenu zupca pri radu prenosnika. Ti lomovi mogu biti izazvani: višestruko ponavljajućim (cikličnim) opterećenjima na savijanje i malobrojnim, ali značajnim po veličini, preopterećenjima udarnog ili statičkog karaktera. Posmatranja pokazuju da kod dužih zubaca često ne nastaje lom celog zupca, već samo njegovog dela. Lom zubaca može nastati zbog velikih statičkih preopterećenja u slučaju nedovoljne čvrstoće zubaca na savijanje, ili usled dinamičkih opterećenja, pri kojima nastaje prekoračenje dinamičkih karakteristika materijala.

Je  
ka  
vr  
.  
.  
Op  
re  
po  
pe  
de  
va  
Pr  
u p  
po  
ka  
no  
na  
ko  
sko  
ne  
se.  
po  
stv  
du  
po  
po  
je z  
rac  
zar  
sm  
obi  
obi  
Ab  
mi  
ma  
zaš  
dov  
evc  
Za  
izm  
nar  
sob  
van  
Zaj  
tak  
rija  
dru  
Pla  
ma  
čeli

Jedan od najrasprostranjenijih vidova razaranja zupčanika je krunjenje radnih površina zubaca. Razlikujemo dve vrste krunjenja:

- ograničeno, ili početno, koje odgovara periodu razradivanja zupčastog para i ograničeno je tim periodom,
- progresivno, koje postepeno raste i dovodi do razaranja radnih površina zubaca.

Ograničeno krunjenje je izazvano koncentracijom opterećenja na malim delovima radnih površina, ili na njenim posebnim neravninama i obično se javlja u početnom periodu rada zupčastog prenosnika. Posle krunjenja ovih delova, kada se nastala opterećenja pre-raspodele i zahvate veliki deo radnih površina, proces se prekida.

Progresivno zamorno krunjenje (piting) se može odvijati u početnom periodu rada samo kod zupčanika čije radne površine imaju visoku tvrdoću. Kod zupčastih prenosnika izrađenih od tvrdih ili od mekih materijala progresivno krunjenje se može odvijati u toku celokupnog vremena rada. Krunjenje metala počinje na mestima najvećih kontaktnih napona i pojavljuje se usled zamora površinskog sloja zupca. Tanki površinski sloj, koji je podvrgnut neprekidnom otvrdnjavanju deformacijom, puca i osipa se. To osipanje je veličine glave čiode ili malo veće, a počinje ispod kinematskog kruga. Zatim je takvom dejstvu podvragnut sledeći sloj. Razaranje se rasprostire u dubinu materijala i zahvata sve veći i veći deo radne površine zupca. Vremenom ovo osipanje zahvata celu površinu i razara je. Razvoj procesa krunjenja posledica je zamora tankih slojeva (debljine  $15 \div 25 \mu\text{m}$ ) materijala radnih površina zubaca. Intenzitet krunjenja zavisi od zamorne čvrstoće materijala, podmazivanja, veličine i smera relativnog klizanja radnih površina zubaca, brzine obrtanja zupčanika, a takođe i od kvaliteta površinske obrade.

Abrazivno habanje je izazvano prisustvom stranih tela, mineralnih ili metalnih čestica među dodirnim površinama zubaca. Takvo habanje dominira pri nedovoljnoj zaštiti prenosnika od nečistoća i slaboj filtraciji ulja. Ono dovodi do slabljenja podnožja zubaca i deformisanja evolventnog profila.

Zadiranje nastaje zbog trenutnog prekida uljnog filma između radnih površina, ili njegovog istiskivanja usled narušavanja režima podmazivanja. Prekid zaštitne sposobnosti uljnog filma izazvan je velikim lokalnim zagrevanjem i plastičnom deformacijom površinskog sloja.

Zajedanje nastaje zbog velikog lokalnog zagrevanja kontaktnih površina. Karakteriše se velikim česticama materijala, koje se otkidaju od jedne površine i zavaruju na drugu, što i određuje stepen oštećenja zubaca.

Plastično deformisanje se pojavljuje na radnim površinama teško opterećenih zupčanika, izrađenih od mekih čelika. Tada dolazi do plastičnog pomeranja čestica ma-

terijala po radnoj površini jednog istog zupca. U tom slučaju nastaje deformisanje (kriviljenje) oblika zubaca. Na radnim površinama jednog zupčanika stvaraju se urezi (žljebovi), a po drugom - izbočine.

Uključivanje i isključivanje zupčanika u aksijalnom smeru (na primer, kod menjača) obično dovodi do oštećenja čela zubaca. Pri prebacivanju zupčanika s jedne na drugu brzinu čela zubaca udaraju jedna o druga. Posledica toga je postepeno krunjenje čeonih ivica. Grebanje čestica cementiranog sloja pri čeonim udarima zubaca olakšano je povećanom krtošcu tog sloja i velikim zaostalim naponima, koji nastaju u vezi sa strukturnom heterogenošću zona cementacionog sloja. Pri nedostatku visoke tvrdoće čela zubaca zapaža se njihovo habanje, ili gnječenje; pri prekomerno visokoj tvrdoći - krto razaranje, koje vodi raspadanju čela zubaca. Pri mekom jezgru i tvrdoj površini čela zubaca nastaje probijanje površinskog sloja. Postoji niz mera koje preduzimaju proizvođači, a koje su usmerene ka smanjenju habanja čela zubaca menjačkih zupčanika. Smanjenje ispadanja zupčanika iz pogona postignuto je:

- primenom racionalnog zaobljenja čela zubaca,
- poboljšanjem termičke obrade čela zubaca,
- primenom savremenih modela racionalnijih kočnih sistema u mašinama i mehanizmima.

Uzroci oštećenja zupčanika vezani su, s jedne strane, za netačnost podataka o opterećenjima, koja deluju na prenosnik i, s druge strane, za odstupanje stvarne čvrstoće zubaca od proračunske, pod uticajem konstruktivnih, tehnoloških i eksploatacionih faktora, nedovoljno uzetih u obzir pri projektovanju. Dejstvo različitih uzroka pokazuje se u pojavi dopunskih sila, koncentraciji napona, nepovoljnom rasporedu zaostalih (unutrašnjih) napona, smanjenju mehaničkih karakteristika materijala i slabljenju opasnog preseka zupca.

Oštećenja zubaca nisu jedina oštećenja zupčanika. Na glavčinama zupčanika često se javlja habanje naležuće površine otvora za vratilo, kao i ožljebljenog dela ili žljeba za klin. Pored toga, na glavčini, paocima i obodu mogu se pojaviti prskotine, iskrivljenost, radikalno bacanje i slično.

### 3. ODREĐIVANJE TEHNIČKOG STANJA (DEFEKTACIJA) ZUPČANIKA

Defektacija zupčanika se sastoji od vizuelnog posmatranja delova zupčanika i izvođenja posebnih tehničkih merenja. Pri defektaciji zupčanika posebna pažnja se obraća na stepen habanja, pravilnost oblika i tvrdoću radnih površina zubaca, proverava se da li postoje gnječenja, prskotine, lom ili zadori na zupcima, obodu, glavčini i žljebovima.

Vizuelnim posmatranjem pažljivo se ispituju uglavnom zupci zupčanika na kojima može biti otkriveno niz oštećenja: lom zubaca, krunjenje, zadori metala, smicanje, plastično deformisanje, stvaranje jamica i dr.

Provera krunjenja površinskog sloja, nagnjećenja i habanja čeonih površina zubaca često se vrši komparativnom (uporednom) metodom sa etalon zupčanicima.

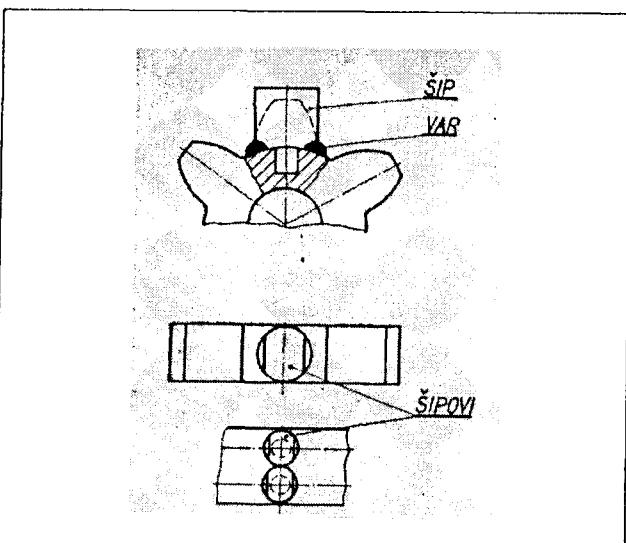
Kod menjačkih zupčanika prvenstveno se utvrđuje nedozvoljeno nagnjećenje i habanje čeonih površina zubaca. Dopušteno je nagnjećenje i habanje čone površine zupca do dužine od 1 mm sa izlaskom na radnu površinu zupca površine manje od  $5 \text{ mm}^2$ .

Habanje zubaca se utvrđuje kontrolom mere preko zubaca i tetivne debljine zupca.

#### 4. METODE REGENERACIJE ZUBACA ZUPČANIKA

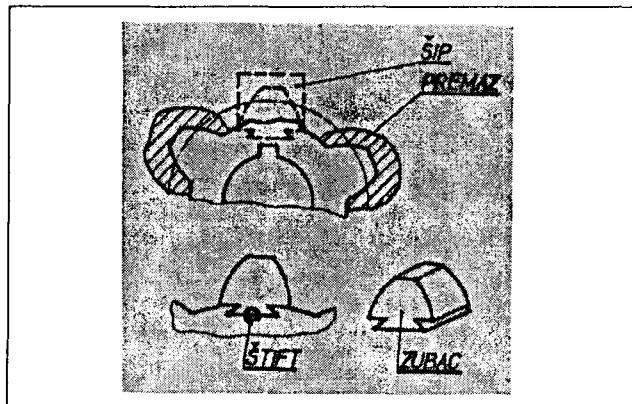
Regeneracija zubaca je najodgovornija remontna operacija zupčanika. Može se izvoditi hladnim - bravarskim metodama i vrućim - navarivanjem.

Zupčanici sporohodnih prenosnika ( $v < 2 \text{ m/s}$ ) regenerišu se hladnim metodama pomoću zavrtnjeva ili umetaka. Regeneracija primenom zavrtnjeva moguća je pri lomu pojedinih zubaca, ali ne više od dva uzastopna, kod zupčanika velikih modula. Deformisani zubac se odseče, ili odrubi do osnove. Zatim se u telu zupčanika, na očišćenim površinama, probuši nekoliko rupa, po celoj širini venca, prečnika  $0.5 \div 0.8$  od debljine zupca. Broj rupa zavisi od širine oboda. U te rupe urezuje se navoj, a u njega se uvrću čelični zavrtnji (šipovi), koji imaju prečnik jednak debljini zupca. Zavrtnji se zavare u osnovi i profil zupca se obradjuje ručno - prema šablonu. Šema ovog metoda regeneracije zupca pomoću jednog i dva šipa prikazana je na slici 1.



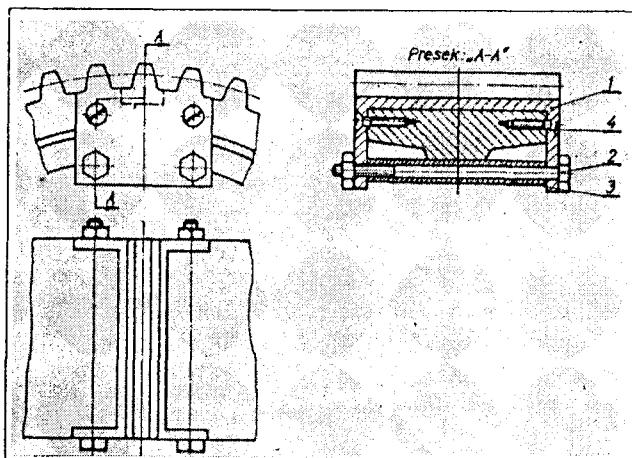
Sl. 1. Regeneracija zubaca zupčanika uvrtanjem šipova

Savršenija varijanta hladnog metoda regeneracije zubača zupčanika sastoji se u sledećem (slika 2). Očišćeno mesto slomljenog zupca se otpušta. Susedni zupci, radi izbegavanja oštećenja pri otpuštanju, premazuju se smešom sastava: 50% vatrootporna glina, 45% isitnjeni (meki) azbest i 5% vodeno staklo. Posle otpuštanja zaštitna smeša (premaz) se udaljuje. Na mestu gde je bio zubac izvadi se žleb u obliku lastinog repa dubine  $1/4 \div 1/3$  visine zupca. U taj žleb se sa strane stavlja zubac, ili šip, ranije pripremljen, koji se učvršćuje navojnim šiftom, zavrtnjem sa upuštenom glavom, ili se sa čela osigura elektrolučnim zavarivanjem. Zatim se, ukoliko je potrebno, vrši obrada na tačan oblik zupca.



Sl. 2. Regeneracija zubaca zupčanika postavljanjem šipa u lastin rep

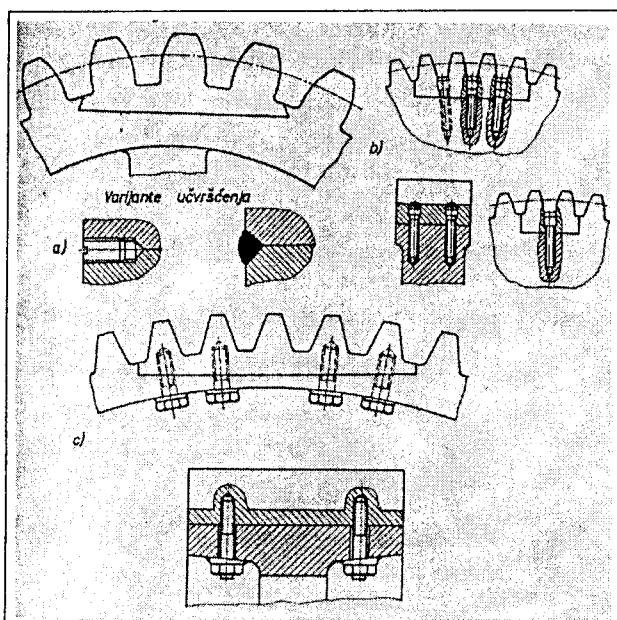
Ukoliko bušenje otvora za zavrtrnje, ili urezivanje lastinog repa, slabi presek venca zupčanika, preporučuje se regeneracija zupčanika primenom dodatka. Za postavljanje dodatka (slika 3) sa čela oboda se prave žlebovi dubine  $0.4 \div 1.0$  modula. Širina žleba bira se na taj način da dodatak (1) zahvata sa svake strane po jedan neoseteći zubac. Dodatak se postavlja u žlebove i učvršćuje zavrtnjima (4). Krajevi dodatka se učvršćuju zavrtnjima (2), koji se postavljaju ispod oboda zupčanika. Da bi se ograničilo savijanje krajeva dodatka, na zavrtnje (2) po-



Sl. 3. Regeneracija zubaca zupčanika pomoću dodatka

stavljaju se distantne čaure (3). Posle podešavanja dodatka zupci se obrađuju na običnim univerzalnim glodalicama.

Pri habanju (krunjenju) ili lomu nekoliko uzastopnih zubaca, regeneracija čeličnih zupčanika se vrši postavljanjem umetaka sa odgovarajućim brojem zubaca. Posle odrubljivanja ili odsecanja oštećenih zubaca, u venac se ukopa žljeb dubine  $1/4 \div 1/2$  visine zupca, u obliku lastinog repa. Zatim se u njega postavi umetak, izrađen od čelika istog kao i zupčanik (slika 4). Umetak se učvršćuje na obodu, s boka, zavrtnjima ili elektrolučnim zavarivanjem (slika 4.a). Pri velikoj dužini umetaka se učvršćuje s čela zavrtnjima (slika 4.b i c). Pre početka regeneracije obod zupčanika na mestu ukopavanja žljeba treba otpustiti. Mesta koja ne podleže otpuštanju treba prekririti premazom. U poljskim uslovima, na sporohodim prenosnicima izvodi se regeneracija zubaca zupčanika bravarskom metodom. To je uvrtanje šipova ili pričvršćivanje umetaka sa narezanim zupcima. Očigledno je da su to samo privremena rešenja.



Sl. 4. Metod regeneracije slomljenih zubaca zupčanika pomoću umetaka, koji su učvršćeni: a - s boka zavrtnjima ili zavarivanjem, b - odozgo zavrtnjima i c - odozdo zavrtnjima

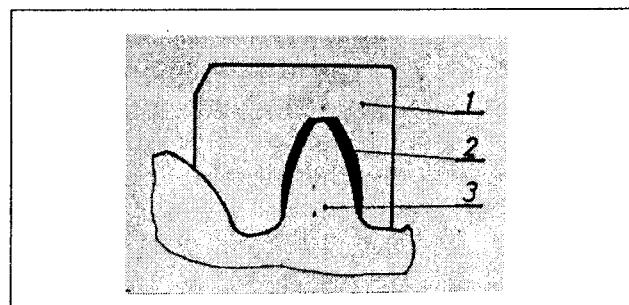
Najsavremeniji način regeneracije oštećenih zubaca zupčanika jeste navarivanjem. Regeneracija dimenzija po habanju zubaca čeličnih zupčanika vrši se navarivanjem. Navarivanje može biti elektrolučno, ručno ili poluautomatsko, ili gasno, pomoću oksi-acetilenskog plamena. Elektrolučno navarivanje se vrši običnim zavarivačkim elektrodama ili specijalnim elektrodama za navarivanje sa debelom oblogom. Površina za navarivanje se prethodno pripremi čišćenjem čeličnom četkom do metalnog sjaja. Elektrolučno navarivanje vrši se pri jačini struje od 150 do 250 A, u jednom sloju, čija debljina posle mehaničke obrade mora biti najmanje 1.5 mm. U navarenom sloju neophodno je ostaviti mali dodatak za

čišćenje i obradu navarenog zupca. Oblik zupca se kontroliše šablonom. Pri navarivanju zubaca malih modula (do 56 mm) ceo zupčanik se neprekidno zagreva topom vodom.

Da bi se izbeglo bacanje zupčanika, navarivanje zubaca se ne vrši uzastopno (jedan za drugim), već svaki  $5 \div 10$  zubac. Radi izbegavanja bacanja (vitoperenja), zupčanik se potopi u vodu tako da nepotopljeno ostane samo mesto koje se navaruje. Ono se prekrije azbestnom trakom sa prorezom za navarivanje. Pored toga moguće je zagrevanje zupčanika do  $200 \div 260^{\circ}\text{C}$ . Posle navarivanja zupčanik se otpušta, zatim se vrši mehanička i termička obrada. Mehanička obrada se vrši na glodalicama ili rendisaljkama za izradu zupčanika. U nekim slučajevima, kada se ne zahteva velika tačnost, moguća je ručna obrada zubaca, turpjanjem ili ručnim električnim brusilicama.

Za zupčanike sa malim modulom ( $m < 5$  mm) navarivanje posebnih zubaca zamenjuje se potpunim navarivanjem zupčastog venca, koje se vrši po celom njegovom obimu. Zatim se na njemu narezuju zupci.

Pri regeneraciji zupčanika velikih modula poželjno je navariti zupce pomoću šablonu, izrađenog od bakra ili mesinga (sl. 5). Šablon sa regenerisanim zupcem obrazuje zatvorenu zapreminu koja se popunjava rastopljenim metalom. Da bi se zadržao korak između zubaca, šablon mora imati oslanjanje na susedni zubac.



Sl. 5. Šema navarivanja zubaca zupčanika pomoću šablonu:  
1 - šablon, 2 - navareni sloj, 3 - regenerisani zupčanik

Ako je zupčanik ranije bio termički obrađen (kaljen), neophodno je kaliti i nove zupce. Oni se zagrevaju gasnim gorionikom do  $750 \div 820^{\circ}\text{C}$ . Susedni zupci moraju pri tome biti premazani zaštitnim mazivom. Posle zagrevanja zupci se brzo hlade vodom i čiste abrazivnim točilom.

Zupčanici regenerisani navarivanjem otpuštaju se, mehanički obrađuju i termički dovode tvrdoću radnih površina zubaca do normi datih na crtežima ili u tehničkim uputstvima. Tvrdoća mora biti, za zupčanike izrađene od ugljeničnih čelika običnog kvaliteta (Č.0545, Č.0645) prosečno HRC  $30 \div 45$ , a za zupčanike od kvalitetnih čelika HRC  $45 \div 65$ . Regenerisane zupčanike, koji rade sa jednosmernim opterećenjem, svršishodno je, ukoliko

postoji mogućnost, montirati u mehanizme sa zaokretanjem za  $180^{\circ}$ . Tako bi se postiglo da regenerisane površine budu neradne, a površine zubaca sa nepromenjenom struktukrom - radne.

Pri regeneraciji zupčanika izrađenih izjedna sa vratilom može biti primjenjen metod regeneracije dela mašinskog elementa. Tada se na pripremljeno (struganjem, glodanjem i sl.) telo zupčanika (ili, bolje reći, vratilo) navuče polufabrikat ili novoizrađeni zupčasti venac u hladnom i zagrejanom stanju. Taj polufabrikat se zavaruje po celoj čeonoj površini za telo zupčanika. Dalje se obrađuje na zahtevane dimenzije i vrši narezivanje zubaca. Pri tome se pre regeneracije termički obrađeni zupčanici otpuštaju, radi lakše mehaničke obrade. Posle presovanja, mehaničke obrade i narezivanja zubaca ponovo se kale.

Ukoliko konstrukcija prenosnika to dozvoljava, pohabani zupci zupčanika mogu se regenerisati naknadnim korigovanjem. Korigovanje se vrši na račun smanjenja prečnika i, samim tim, međuosnog rastojanja.

## 5. REZULTATI IZ REMONTNE PRAKSE

Da bi se utvrdila racionalnost i rentabilnost regeneracije zupčanika u TRZ Čačak izvršena je regeneracija i ispitivanje na primeru dva zupčanika. Uzeti su zupčanici koji do sada nisu regenerisani, i to:

1. Zupčanik I brzine i hoda unazad menjača tenka T-55
2. Zupčanik sinhrona glodalice.

Oba zupčanika su cilindrična sa pravim zupcima. Rade sa srednjim i većim brzinama, ali je prvi zupčanik izložen znatnim opterećenjima dinamičkog karaktera. Pošto su to zupčanici stranih proizvođača njihova nabavka je u sadašnjim uslovima gotovo nemoguća. Kako se ovi zupčanici pri svakom remontu mašina, kojima pripadaju, odbacuju prešlo se na njihovu izradu.

Sve geometrijske i kinematske mere, kao i tvrdoća površinskog sloja, koje su karakteristične za upoređivanje novih i regenerisanih zupčanika, date su u tabeli 1.

Zbog razlike u eksploracionim uslovima i režimima rada dolazi do različitih oštećenja zupčastih venaca ovih zupčanika. Tako, na prvom zupčaniku dolazi do krunjenja radnih, cementiranih površina zubaca u zoni ispod kinematskog kruga. Takođe je očigledno da je ovo krunjenje veće na strani zupčanika I brzine. Kod drugog zupčanika dolazi do znatnog habanja čela svih zubaca. Pored toga, može se uočiti i neznatno habanje bočnih površina zubaca koje u trenutku odbacivanja zupčanika zbog oštećenja ne dostiže više od 3% od tetivne debljine zupca na podeonu krugu.

Uzimajući u obzir režime u kojima rade ovi zupčanici, zahtevani kvalitet obrade i tvrdoću koja je neophodna da bi se obezbedio vek trajanja zupčanika približno isti novoizrađenom pristupilo se regeneraciji metodom ruč-

nog elektrolučnog navarivanja. Navarivanje je vršeno elektrodom CASTOLIN 2 koja daje tvrdoću navarenog sloja HRC  $57\div62$ . Na prvom zupčaniku je brušenjem skinut cementacioni sloj sa oštećenih radnih površina zubaca. Neradne površine susednih zubaca zaštićene su bakarnim limom pa se tek onda prešlo na navarivanje. Bravar ručnom brusilicom dovodi zupce na približan oblik i uvećane mere, a završnim brušenjem na tačan oblik, mere i kvalitet obrade. Kod drugog zupčanika su neoštećene površine zubaca prilikom navarivanja bile zaštićene azbestnim platnom.

Ovako regenerisani zupčanici su kontrolisani na evolventometru, gde je određivano odstupanje pravca zupca, tolerancija evolvente i radikalno bacanje. Zatim je ispitivana tvrdoća površina izloženih habanju, određivane stvarne geometrijske mere i kvalitet obrađenih površina zubaca. Svi rezultati su dati u tabeli 1. Pored toga, u tabeli 1 su dati i troškovi materijala i izrade novih zupčanika, normirani za pojedinačnu proizvodnju. Proizvodne mogućnosti, postojeća oprema i kvalifikaciona struktura radnika TRZ omogućavaju kako izradu novih, tako i regeneraciju pohabanih zupčanika, što je važan preduслов za komparaciju.

Pri upoređivanju uzete su sledeće vrednosti karakterističnih parametara: prosečna vrednost norma časa (NČ) 10 DEM, cena 1 kg materijala (Č.5421 i Č.4320) 2.90 i 2.40 DEM i cena 1 kg elektrode CASTOLIN 2 240 DEM. Ušteda u materijalu i troškovima izrade postupka regeneracije u odnosu na novu izradu računata je tako što je od cene nove izrade oduzeta cena regeneracije, ta razlika podeljena sa cenom izrade i pomnožena sa 100. Na taj način ušteda je data u %.

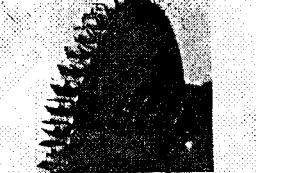
U ovoj analizi nije uzeto u obzir veoma teško nabavljanje visokokvalitetnih čelika za cementaciju i prilično jednostavan geometrijski oblik zupčanika, što sve ide u prilog uvođenju postupaka regeneracije.

## 6. ZAKLJUČAK

Promenljiva ugaona brzina zupčanika izaziva udarna opterećenja na zupcima, čija veličina zavisi od mase obrtnih elemenata, karaktera i veličine deformacije profila, obimne brzine i drugog. Izmerena veličina habanja se upoređuje sa dozvoljenom graničnom, pa se na osnovu toga određuje da li je zupčanik ispravan ili je za regeneraciju.

U radu je prikazana ušteda u materijalu i troškovima izrade kod do sada neregenerisanih cilindričnih evolventnih zupčanika sa pravim zupcima, prilično jednostavne konstrukcije. Može se prepostaviti kolika bi bila ekonomska opravdanost regeneracije zupčanika složenije konstrukcije (zupčanika izrađenog izjedna sa vratilom, snopova zupčanika, zupčastih venaca, zamajaca velikih prečnika, zupčastih venaca sa unutrašnjim ozubljenjem

Tabela 1

Naziv	Zupčanik i brzine i hoda unazad	Zupčanik sinhrona glodalice
Materijal	Č.5421	Č. 4320
Geometrijske mere	$m=9, z=12, \alpha_0=20^0, \beta=0^0, d_0=108 \text{ mm}, dk=127.8_{-0.5} \text{ mm}, d_f=96_{-1.5} \text{ mm}, b=100_{-0.23} \text{ mm}, W_2=43.2132 \text{ mm}, xm=+2.7 \text{ mm}$	$m=2.5, z=51, \alpha_0=200, \beta=0^0, d_0=127.5 \text{ mm}, dk=132.5_{-0.5} \text{ mm}, d_f=122_{-1.0} \text{ mm}, b=10_{-0.1} \text{ mm}, W_6=42.3775 \text{ mm}, xm=0$
Kvalitet obrade	N7	N7
Tvrdoča zubaca	$HRC \geq 56$	$HRC = 55+58$
Izgled zupčanika izbačenog iz eksploracije		
Nalaz defektatora	Krunjenje radnih površina svih zubaca ispod i oko kinematskog kruga	Habanje čeonih površina svih zubaca preko 20 % od prvoibitne dužine zubaca
Metod regeneracije	REL navariv. elektrodom CASTOLIN 2	REL navariv. elektrodom CASTOLIN 2
Postupak regeneracije	Odmašćivanje, defektacija, brušenje (4.0 NČ), pranje (0.2 NČ), navarivanje (3.0 NČ), bravarski radovi (2.0 NČ) i brušenje (10.0 NČ)	Odmašćivanje, defektacija, navarivanje (2.5 NČ), bravarski radovi (2.0 NČ) i brušenje (5.0 NČ)
Kontrolisane mere (Tolerancija mere preko zubaca)	$dk=127.4 \text{ mm}, W_2=42.92 \text{ mm}, b=99.9 \text{ mm}$ ( $Awd=-308 \mu\text{m}, Awg=-88 \mu\text{m}$ , JUS M. C1. 034)	$dk=132.2 \text{ mm}, W_6=42.18 \text{ mm}, b=10 \text{ mm}$ ( $Awd=-224 \mu\text{m}, Awg=-64 \mu\text{m}$ , JUS M. C1. 034)
Tolerancija profila zupca $T_{ev}$	 $T_{ev}=16 \mu\text{m}$ (dozvoljeno $T_{ev}=18 \mu\text{m}$ , JUS M.C1.035)	 $T_{ev}=8 \mu\text{m}$ (dozvoljeno $T_{ev}=12 \mu\text{m}$ , JUS M.C1.035)
Tolerancija bočne linije zupca $T_\beta$	 $T_\beta=13 \mu\text{m}$ (dozvoljeno $T_\beta=18 \mu\text{m}$ , JUS M.C1.033)	 $T_\beta=8 \mu\text{m}$ (dozvoljeno $T_\beta=11 \mu\text{m}$ , JUS M.C1.033)
Radijalno bacanje $T_r$	$Tr=20 \mu\text{m}$ (dozvoljeno $Tr=78 \mu\text{m}$ , JUS M.C1.035)	$Tr=35 \mu\text{m}$ (dozvoljeno $Tr=59 \mu\text{m}$ , JUS M.C1.035)
Dobijeni kvalitet obrade	N7 $Ra=1.60 \mu\text{m}$ , JUS M.A1.020	N7 $Ra=1.60 \mu\text{m}$ , JUS M.A1.020
Dobijena tvrdoča	$HRC = 62.6$	$HRC = 63.2$
Izgled regenerisanog zupčanika		
Vreme regeneracije	19,2 NČ (192 DEM)	9,5 NČ (95 DEM)
Troškovi materijala	CASTOLIN 2 $\phi 3,2$ 300 gr (70 DEM)	CASTOLIN 2 $\phi 2,5$ 80 gr (20 DEM)
Postupak nove izrade	Struganje (6.5 NČ), glodanje (12.0 NČ), rendisanje (8.0 NČ), termička obrada (3.0 NČ) i brušenje (14.0 NČ)	Struganje (8.0 NČ), glodanje (7.0 NČ), termička obrada (2.5 NČ) i brušenje (9.5 NČ)
Vreme nove izrade	43,5 NČ (435 DEM)	27 NČ (270 DEM)
Troškovi materijala	Č.5421, $\phi 130 \times 110$ , 12 kg (35 DEM)	Č.4320, $\phi 140 \times 40$ , 5 kg (12 DEM)
Ušteda 100 (Cni- Cr)/Cni(%)	44.2 %	59.2 %

ogromnih prečnika - i preko 2000 mm i slično) ili zupčanika kod kojih je oštećen jedan ili nekoliko zubaca. Ne treba pokušavati regeneraciju samo onih zupčanika čije konstruktivne karakteristike ne omogućavaju slobodan prilaz reznog alata regenerisanom mestu.

## LITERATURA

- [1.] AŠEKO, S. M., KLAUZ, P. L., SOKOLOV, K. A., *Remont stroiteljnih putevih i pogruzočnorazgrubočnih mašin*, Transport, Moskva, 1967.
- [2.] KUZMIN, R. V., *Defektacija sudovih mehanizmov*, Transport, Moskva, 1967.
- [3.] TANASIJEVIĆ, S., *Osnovi tribologije mašinskih elemenata*, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
- [4.] FORREST, P. G., *Fatigue of metals*, Pergamon press, Oxford-London-New York-Paris, 1962.

## Savings in Material and Machining Costs of The Worn Tooth Gears by The Regeneration Method

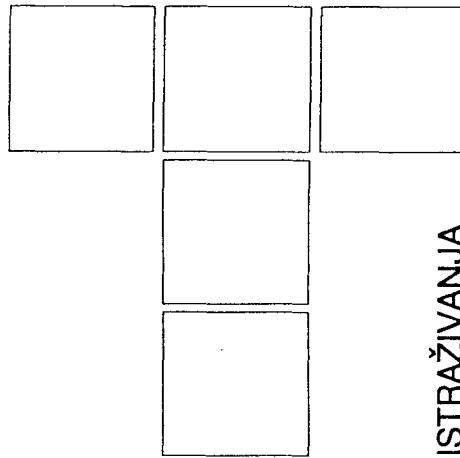
*Regeneration of tooth gears consists of detection of their damages, cause and character of the same, application of the most rational method of regeneration and method of the working surfaces hardening.*

*In the paper are presented the most frequent exploitational damages of tooth gears as well as the existing methods of defectation and regeneration. Then we considered the case of the two most frequent recorded types of teeth wear (wear of working surfaces and wear of the front surfaces) on different tooth gears. As an example for the tooth gear with worn side surfaces we considered the tooth gear of the first gear and reverse on the gear box of the tank T - 55. The tooth gear of the synchrone of the milling machine was taken as the representative of the tooth gear with the worn front surfaces of teeth. These tooth gears were regenerated by the manual arc welding on and machined to the prescribed dimensions and machining quality. Then the analysis was performed of the geometric accuracy and mechanic characteristics of the regenerated tooth gear. At the end the comparison was made of the manufacturing costs of the new tooth gear and the regeneration costs of the worn tooth gear, for both cases. It turned out that the regeneration of the tooth gears, in both cases, is technically and economically justified.*

## Экономия материала и снижение расходов восстановления изношенных зубчатых колёс

*Восстановление зубча́тых колёс требует вскрытия повреждений зубча́тых колёс, их причин и характера, применения наиболее эффективных методов восстановления, и упрочнения рабочих поверхностей зубьев.*

*В работе приводятся наиболее частые возникающие эксплуатационные повреждения зубча́тых колёс и существующие методы вскрытия в восстановления. Аналитически рассмотрены случаи двух наиболее частых видов изнашивания зубьев (износ их рабочих и лобовых зубьев) на разных типах зубча́тых колёс. Образцом зу́йчастого колеса с изношенными боковыми поверхностями служило зубча́тое колесо первой передачи и заднего хода танка Т-55. Для исследования повреждений на лобовых поверхностях зубьев использовали синхронную шестерню фрезерного станка. Зубья восстанавливали ручной электро-дуговой наплавкой, учитывая необходимое качество обработки и нужные размеры. После этого анализировали геометрическую точность и механические характеристики восстановленного зубча́того колеса. В конце исследования проведено сравнение расходов изготавления и восстановления обоих типов изношенных зубча́тых колёс, показавшее, что восстановление в обоих случаях экономически целесообразно.*



*N. MILIĆ, B. JEREMIĆ, M. BABIĆ*

# Dinamičko ponašanje glavnih vretna obradnih centara

ISTRAŽIVANJA

## 1. UVOD

U cilju uvođenja aktivnosti preventivnog održavanja u postojeći sistem održavanja grupe istih obradnih centara "MAHO MC-50" u fabriци "Zastava namenski proizvodi" d.o.o. vršeno je praćenje dinamičkog ponašanja ovih tehničkih sistema u procesu njihove eksploatacije. Pomenuti obradni centri rade u uslovima serijske proizvodnje i visokog vremenskog stepena iskorišćenja na liniji za izradu vitalnih delova pištolja "CZ-99".

Zbog zahtevanog visokog kvaliteta i tačnosti obrade ovih obradnih centara, kao osnovnih kriterijuma funkcije njihovog cilja, neophodno je posebnu pažnju posvetiti glavnom vretenu ovih alatnih mašina i njegovom sistemu uležištenja. Različiti poremećajni sistemi u toku eksploatacije utiču na promenu stanja glavnog vretna i njegovog dinamičkog ponašanja.

Praćenje promena u dinamičkom ponašanju glavnih vretna ovih obradnih centara treba da omogući identifikaciju stanja ovih sistema i planiranje vrste i obima aktivnosti na poslovima održavanja.

## 2. PROGRAM I USLOVI ISTRAŽIVANJA

Program istraživanja je obuhvatao formiranje odgovarajućeg mernog lanca za praćenje dinamičkog ponašanja glavnih vretna preko izabranih dijagnostičkih parametara sa ciljem utvrđivanja njihove pouzdanosti, osetljivosti i trenda promene.

Dinamičko ponašanje glavnih vretna ispitivanih obradnih centara praćeno je preko amplitudno-frekventnih karakteristika ubrzanja kretanja kućišta uležištenja u tri međusobno upravne ose. Merenja su vršena na obradnim centrima sa fabričkim brojevima 58343, 58345, 58349 i 58350 posle određenog broja radnih sati u toku treće godine njihove eksploatacije i za različite brojve obrtaja glavnog vretna: 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000 i 5500 o/min.

Merenje ubrzanja oscilacija je zahtevalo zaustavljanje rada svakog ispitivanog obradnog centra, zbog instaliranja mernog lanca i postavljanja davača u odgovarajuću mernu tačku. Po postavljanju davača i instaliranju mernog lanca mašine su puštane u pogon u periodu od 3 do 5 minuta, pre samog početka merenja, radi postizanja uniformnog uljnog filma u svim tribi-mehaničkim sistemima koji se podmazuju i dostizanja optimalne radne temperature. Ispitivani obradni centri obrađuju čelik i aluminijum, pri čemu su najzastupljenije operacije obrade glodanjem vretenastim glodalima prečnika  $\phi 5$  do  $\phi 16$  mm. Čelik se obrađuje brzinom rezanja od  $v=20$  m/min, a aluminijum brzinama  $v=70-100$  m/min.

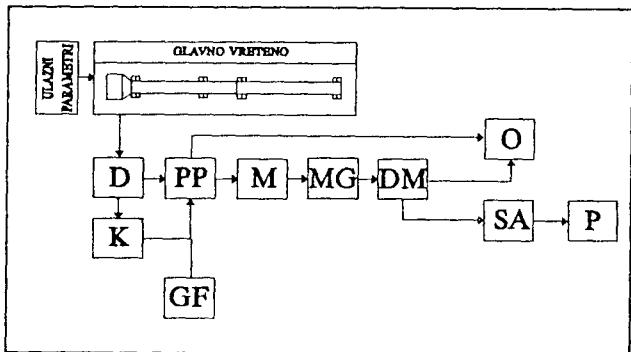
## 3. MERNA INSTRUMENTACIJA

Za praćenje dinamičkog ponašanja glavnih vretna ispitivanih obradnih centara formiran je, na osnovu raspoložive opreme, merni lanac prikazan na slici 1.

Zbog merenja u eksploatacijskim (proizvodnim) uslovima, nije bilo mogućnosti da se čitav merni lanac postavi na mestu gde se merenje i vrši, pa je signal sniman pomoću magnetofona i kasnije obrađivan u Centru za teroteknologiju na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu.

---

*Mr Nenad Milić, dipl. ing., asistent  
Prof. dr Branislav Jeremić, dipl. ing.,  
Prof. dr Miroslav Babić, dipl. ing.  
Mašinski fakultet u Kragujevcu*



Sl. 1. Merni lanac za praćenje dinamičkog ponašanja glavnih vretera:

D - davač ubrzanja Brüel & Kjær

K - kalibrator davača ubrzanja Brüel & Kjær tip 4291

PP - predpojačavač Brüel & Kjær tip 2625

GF - generator funkcije ISKRA MA 3730

M - PCM modulator signala Jöhne + Reilhofer  
TM 8K 10

MG - magnetofon - uređaj za snimanje signala  
PCM X SI 7 Stellavox sa magnetskom trakom  
BASF ferro LH HiFi LP 35 (275m/902')

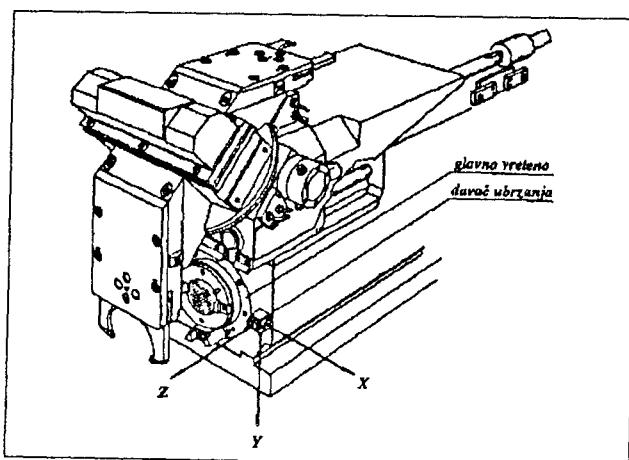
DM - PCM demodulator signala Jöhne + Reilhofer  
TD 8K 10

O - osciloskop Iskra MA 4046

SA - spektralni analizator Hewlett Packard 3582A

P - ploter Hewlett Packard 7090A

S obzirom na dosta kompaktnu konstrukciju samog kućišta glavnog vretera i na činjenicu da je glavne ose osetljivosti davača trebalo poklopiti sa odgovarajućim osama vretera i željenim pravcima merenja oscilacija, merna tačka za postavljanje davača se nalazila na samom kućištu glavnog vretera, neposredno uz konusnu čauru za prihvatanje. Sam položaj davača i orientacija njegovih osa osetljivosti u kojima su i merene oscilacije prikazan je na slici 2.



Sl. 2. Položaj davača ubrzanja pri merenju oscilacija kućišta glavnog vretera

Na ovaj način davač se nalazio na najkraćoj putanji prostiranja oscilacija sa prednjeg para kugličnih ležajeva sa kosim dodirom, kojima je uležišteno vreto na tom kraju. Ovi ležajevi se upareni koriste za uležištenje glavnog vretera, imaju dimenzije 60x85x13 i oznaku proizvođača 719 12AC GA/P4 (SKF) ili B 71912 E (FAG).

Ležajevi su trajno podmazani i ne zahtevaju nikakvo dodatno podmazivanje u toku svog rada.

#### 4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Radi korektnog tumačenja rezultata praćenja dinamičkog ponašanja glavnih vretera u vidu amplitudno-frekventnih karakteristika, izvešeno je prethodno određivanje sopstvene učestanosti oscilovanja glavnog vretera obradnog centra "MAHO MC- 50" eksperimentalnim putem i uz pomoć matematičkog modela slobodnih prigušenih oscilacija. Na taj način utvrđene se vrednosti sopstvenih učestanosti u sve tri ose:  $f_x = 466.25 \text{ Hz}$ ,  $f_y = 440.73 \text{ Hz}$ ,  $f_z = 436.37 \text{ Hz}$ , kao i frekvencije oscilovanja koje ograničavaju rezonantne oblasti:

$$f_{1x} = 412.87 \text{ Hz}; f_{2x} = 547.70 \text{ Hz}$$

$$f_{1y} = 391.55 \text{ Hz}; f_{2y} = 514.77 \text{ Hz}$$

$$f_{1z} = 385.43 \text{ Hz}; f_{2z} = 514.92 \text{ Hz}$$

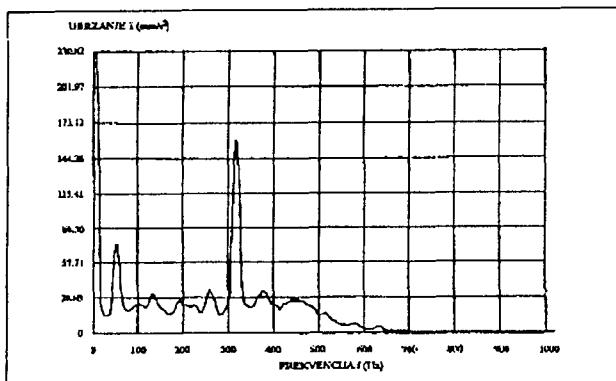
Ove frekvencije ograničavaju rezonantnu oblast glavnog vretera, u kojoj dolazi do pojačanja amplituda, tako da se ista, pri identifikaciji dinamičkog ponašanja, ne uzima u razmatranje.

Na slikama 3. + 5. prikazane su amplitudno-frekventne karakteristike za glavno vreto obradnog centra 58349 posle 13749 radnih sati pri 4000 o/min za sve tri ose merenja.

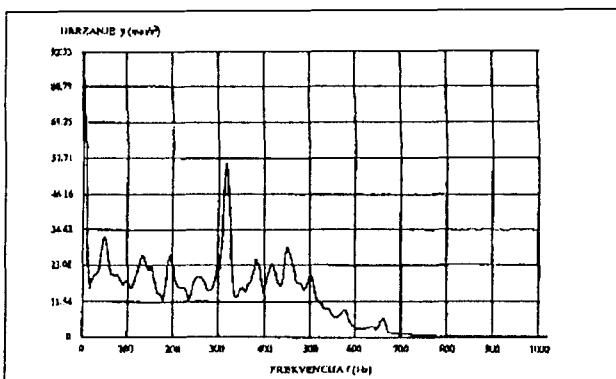
Na ovim spektrima se uočava dominantna frekvencija od 320 Hz koja je karakteristična za sve tri ose merenja pri ovom broju obrtaja i koja se javlja i u većini ostalih dobijenih rezultata, pri istom broju obrtaja. Takođe, sa ovih slika se vidi odnos između maksimalnih amplituda izmerenih po osama, pri čemu su najveće amplitude dobijene u X-osi, a najmanje po Z-osi. Ova konstatacija se odnosi na sve dobijene spekture, a predstavlja posledicu izabranog položaja davača ubrzanja, odnosno orientacije njegovih osa osetljivosti (merenja). Pri ovoj orientaciji, X-osa davača se poklapa sa pravcem i smerom sa inercijalnom silom, koja nastaje od mogućeg debalansa glavnog vretera, prilikom svakog obrtaja oko njegove ose.

Na svim dobijenim spektrima se uočavaju dominantne frekvencije, koje se ponavljaju kod svih ispitivanih obradnih centara i koje odgovaraju određenom broju obrtaja, bez obzira na osu merenja. Ove dominantne frekvencije su prikazane u tabeli 1.

Ako se analiziraju svi dobijeni rezultati, onda se kod nekih obradnih centara mogu uočiti određena odstupanja od ovih dominantnih frekvencija. Ona se odnose na obradni centar 58343, kod koga se pri 2000 o/min u Z-osi javlja frekvencija od 160 Hz, zatim pri 4000 o/min u Y-osi frekvencija od 456 Hz i pri 5000 i 5500 o/min javljaju se frekvencije od 168, odnosno 184 Hz. Kod obradnog cen-



Slika 3. Amplitudno-frekventna karakteristika signala oscilovanja ubrzanja kretanja kućišta glavnog vretena u pravcu X-ose pri 4000 o/min za obradni centar 58349 posle 13749 radnih sati



Slika 4. Isto kao na slici 3., samo za Y-osi

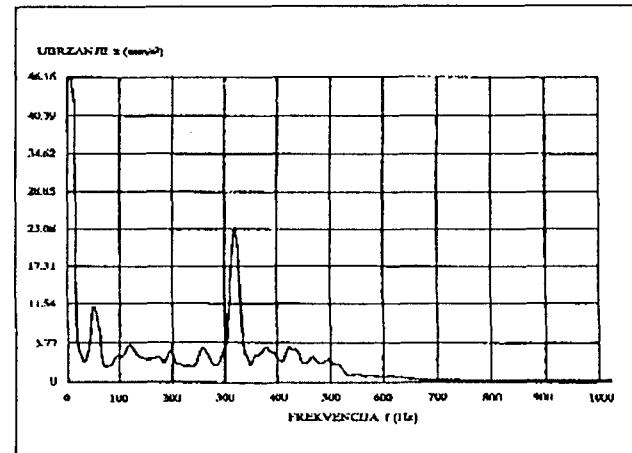
tra 58345 javlja se frekvencija od 160 Hz, pri 2000 o/min u sve tri ose, a kod obradnog centra 58350 dolazi do odstupanja u Z-osi pri 1500 o/min - 252 Hz, zatim pri 2000 o/min kod X i Y-ose - 344 Hz i kod Z-ose - 252 Hz.

Tabela 1. Dominantne frekvencije u dobijenim amplitudno-frekventnim karakteristikama.

Broj obrtaja glavnog vretena (o/min)	Dominantna frekvencija (Hz)
500	308
1000	252
1500	376
2000	320
3000	236
4000	316
5000	84
5500	92

Ove frekvencije koje odstupaju od uobičajenih, u većini slučajeva predstavljaju neke od harmonika frekvencija prikazanih u tabeli 1. Tako npr. frekvencija od 160 Hz predstavlja "half" harmonik frekvencije od 320 Hz, a frekvencije od 168 i 184 Hz predstavljaju drugi harmonik frekvencije okretanja vretena (84 i 92 Hz).

Osnovni harmonici od 84 i 92 Hz (pri 5000 i 5500 o/min) javljaju se usled neizbalansiranosti glavnog vretena, a njihovi drugi harmonici su posledica neuravnjenosti i iskošenosti istog (usled mehaničkih oštećenja) i ovo su najčešći uzroci njihove pojave. U znatno manjoj meri su na nekim od dobijenih karakteristika izraženi interharmonici ( $0.5 \cdot 1.5 \cdot 2.5 \cdot n/60$ ), koji predstavljaju posledicu mehaničke labavosti glavnog vretena. Sve ove frekvencije pripadaju nisko-frekventnom području.



Slika 5. Isto kao na slici 3., samo za Z-osi

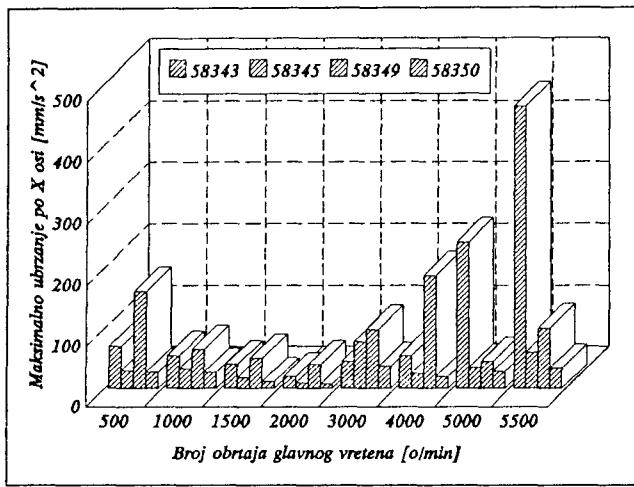
Precizno fizičko tumačenje pojave ostalih dominantnih frekvencija nije dato zbog velike složenosti sklopa glavnog vretena, koje je preko spojničkog vratila vezano za menjач-reduktor za prenos glavnog kretanja, a ovaj preko kaišnika za pogonski elektromotor. Zbog velikog broja tribno-mehaničkih sistema koje ovakav sklop sadrži, nije moguće odrediti uzroke pojave ovih frekvencija koje se javljaju u srednje frekventnom području.

U području visokofrekventnih komponenti (preko 2 kHz) nema pojave dominantnih frekvencija, koje bi predstavljale posledicu oštećenja u kotrljajućim elementima ležajeva glavnog vretena.

Sve navedene dominantne frekvencije javile su se pri svim izvršenim merenjima, bez obzira na broj radnih sati obradnih centara i odlikuju se najvećim amplitudama u dobijenim spektrima.

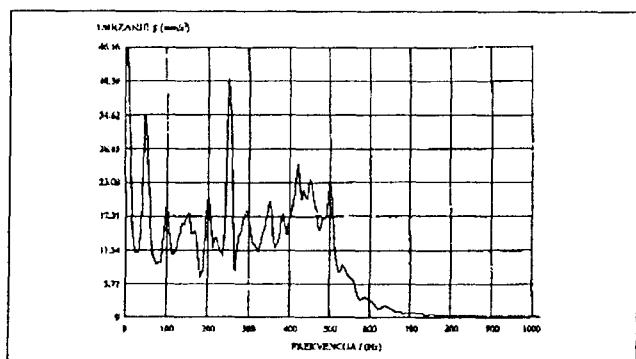
Ako se analiziraju maksimalna ubrzanja (amplitude), posle približno istog broja radnih sati, za različite brojeve obrtaja glavnog vretena i različite obradne centre, a za sve tri ose merenja, mogu se dobiti histogramski prikazi međusobnih odnosa, čiji je karakterističan primer dat na slici 6.

Uočava se zakonitost promene veličine amplituda sa porastom broja obrtaja, pri čemu amplitude opadaju od 500 do 2000 o/min, a zatim rastu do 5500 o/min, kada obično dostižu maksimum. Od ovog trenda odstupa jedino obradni centar 58345, kod koga amplitude imaju maksimume, osim na početku i na kraju intervala varira-

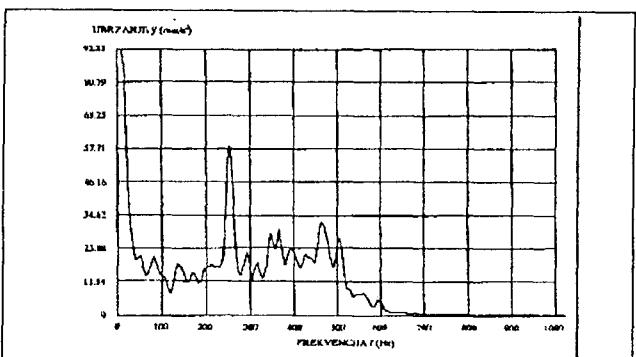


Sl. 6. Amplitudne ubrzanja kretanja po X-osi posle približno 12400 radnih sati

nih brojeva obrtaja, i pri 3000 o/min. Takođe, ovakav trend se javlja i kod ostalih obradnih centara za Y-osi posle 12400 i 13460 radnih sati. Karakteristični primjeri amplitudno-frekventnih spektara koji ilustruju porast amplituda na dominantnim frekvencijama u toku vremena eksploracije su prikazani na slikama 7. + 9.



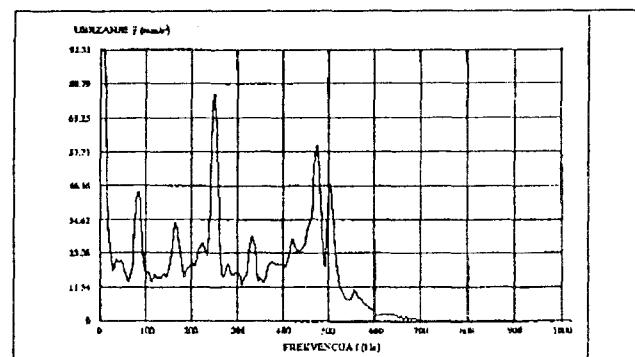
Sl. 7. Amplitudno-frekventna karakteristika ubrzanja kretanja po Y-osi pri 1000 o/min za obradni centar 58343 posle 11775 radnih sati



Sl. 8. Isto kao na slici 7., samo posle 12346 radnih sati

Trend porasta amplituda oscilovanja na dominantnim frekvencijama u toku vremena eksploracije se može i histogramski prikazati, kao na slici 10.

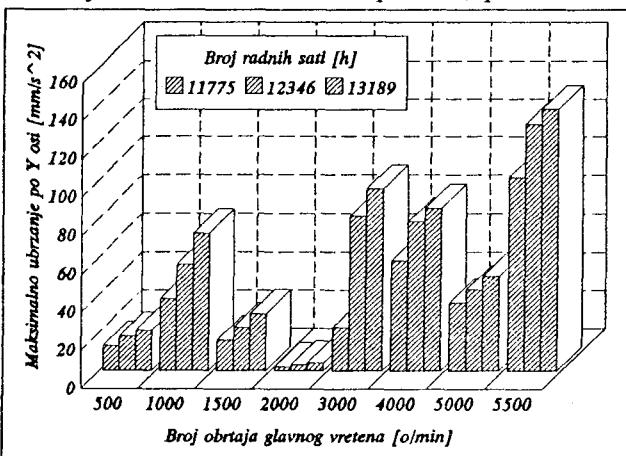
Ovakav trend porasta vrednosti amplituda ukazuje na razvoj triboloških procesa kod ispitivanih funkcionalnih celina glavnih vretera, usled čega dolazi do povećanja neuravnjenosti, iskošenosti, ekscentričnosti i povećanja zazora posmatranih sistema. Međutim, na osnovu završne kontrole gotovih predmeta obrade, može se sa sigurnošću reći da je, sa aspekta kvaliteta i tačnosti obrade, stanje ovih obradnih centara i njihovih glavnih vreterna još uvek dobro.



Sl. 9. Isto kao na slici 7., samo posle 13189 radnih sati

Ova poslednja konstatacija ukazuje na činjenicu da izmene vrednosti amplituda ubrzanja kretanja (oscilovanja) kućišta glavnih vretera još uvek nisu dostigle svoje granične vrednosti, koje bi ukazivale na neku drastičnu promenu stanja ovih tehničkih sistema, tj. na moguću pojavu otkaza.

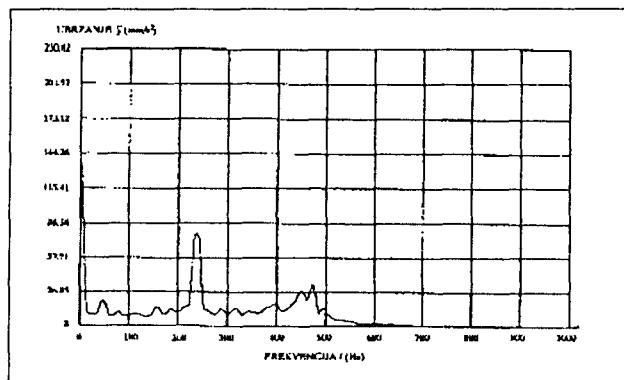
Trend porasta vrednosti amplituda oscilovanja najintenzivniji je kod obradnog centra 58345, što ukazuje da je i brzina odvijanja triboloških procesa kod ovog sistema najveća. Posledica ovih procesa jeste povećanje zazora u sklopu glavnog vretera. Takođe, dobijeni rezultati pokazuju izražen porast vrednosti amplituda po Z-osi za obradni centar 58349, u periodu između 12564 i 13749 radnih sati. Uzrok ovome treba tražiti prvenstveno u povećanju aksijalnih zazora u sistemu uležištenja glavnog vretera. Tribo-mehanički sistemi glavnog vretera kod kojih će, usled triboloških procesa, prvo doći do



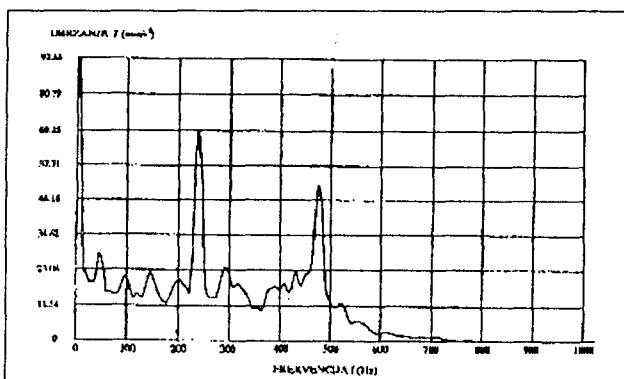
Slika 10. Amplitudne ubrzanja kretanja po Y-osi za obradni centar 58343

stvaranja i povećanja zazora u toku eksploatacije jesu spoj radnog vretena i ožlebljenog dela spojničkog vratila, koji se ostvaruje preko čaure radnog vretena sa unutrašnjim ožlebljenjem i spoljašnjeg ožlebljenja spojničkog vratila, zatim zazor se javlja između kandži sistema za stezanje alata i radnog vretena, u sistemu zavrtnjeva i osovinica kojima se vezuje trn za stezanje alata i zazor se, naravno, javlja u samim ležištima glavnog vretena (radijalno-uporna). Osnovni uzrok pojave ovih zazora jesu udarna opterećenja koja se javljaju pri radu ovog sistema, a koja uzrokuju mala oscilatorna pomeranja spojničkog vratila, usled čega se i javlja pojava fretting korozije na njegovom ožlebljenom delu.

Na slikama 11. + 14. prikazane su amplitudno-frekventne karakteristike svih ispitivanih obradnih centara po Y- osi pri 3000 o/min i posle približno istog perioda eksploatacije. Ako se porede veličine amplituda pri dominantnoj frekvenciji od 236 Hz, može se zaključiti da je najmanja amplituda izmerena kod obradnog centra 58350, dok su kod ostalih obradnih centara one veće. Ova tendencija važi i za druge dve ose (X i Z) merenja ubrzanja.

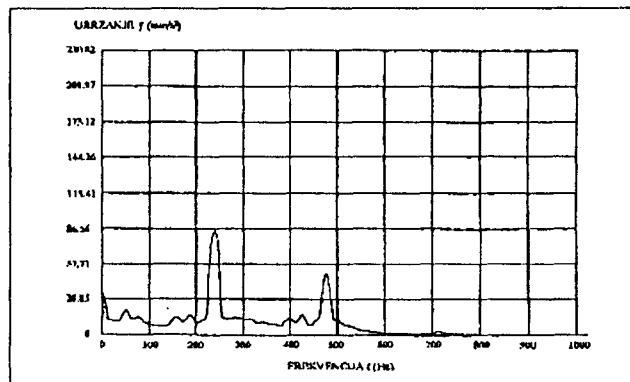


Slika 11. Amplitudno-frekventna karakteristika ubrzanja oscilatornog kretanja kućišta glavnog vretena obradnog centra 58343 u Y-osi pri 3000 o/min posle 12346 radnih sati



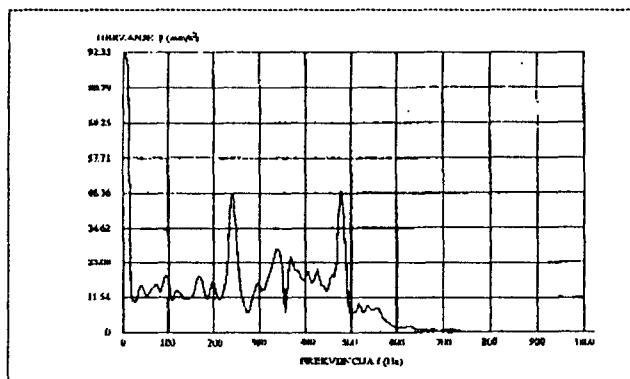
Slika 12. Isto kao na slići 11., samo za obradni centar 58345 posle 12266 radnih sati

Uzrok ovoj pojavi treba tražiti u činjenici da se na obradnom centru 58350 obrađuju radni komadi od aluminijuma, dok se na ostalim centrima obrađuju komadi od čelika. S obzirom na potrebne sile rezanja, koje su veće



Slika 13. Isto kao na slići 11., samo za obradni centar 58349 posle 12564 radnih sati

kod obrade elemenata od čelika, normalno je da su i opterećenja koja trpi sistem glavnog vretena i njegovog uležištenja, a koja se prenose preko alata i konusa u vretenu za njegov prihvati, znatno veća kod obrade čelika. Takav karakter opterećenja posmatranog sistema utiče i na intenzivnije odvijanje triboloških procesa i stvaranje zazora i različitih mehaničkih oštećenja kod obradnih centara koji obrađuju čelik, pa samim tim i na veće amplitude ubrzanja.



Slika 14. Isto kao na slići 11., samo za obradni centar 58350 posle 12489 radnih sati

## 5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

S obzirom da su ispitivani obradni centri kupljeni sredstvima stranog ulagača i da se na njima proizvode delovi sa veoma strogim zahtevima u pogledu tačnosti i kvaliteta obrade, a koji predstavljaju osnovne elemente proizvoda namenjenog prvenstveno stranom tržištu, težilo se da se praćenjem promene njihovog stanja dođe do informacija, neophodnih za donošenje odgovarajućih odluka o intenzitetu aktivnosti održavanja u cilju obezbeđenja zahtevane eksploatacione pouzdanosti.

Kako najveći uticaj na pravilno kretanje reznog alata prilikom procesa obrade ima glavno vretno i njegov sistem uležištenja, praćenje dinamičkog ponašanja navedenog sklopa trebalo je da pruži najveći broj informacija o stanju istog. Dobijene amplitudno-frekventne karakteristike, na osnovu dominantnih frekvencija oscilovanja i njihovih harmonika, treba da omoguće prepoznavanje

pojedinih elemenata strukture alatih mašina, čije stanje predstavlja potencijalni uzrok nastanka otkaza.

Dobijeni rezultati ispitivanja dinamičkog ponašanja glavnih vretena potvrđuju veliki značaj izbora mesta postavljanja davača ubrzanja i orientacije njegovih osa osetljivosti u odnosu na pravac širenja i prostiranja vibracija.

S obzirom na očigledan trend porasta vrednosti amplituda oscilovanja u toku vremena, može se reći da one predstavljaju dovoljno osetljiv dijagnostički parametar stanja glavnih vretena obradnih centara, a samim tim mogu biti i dovoljan makropokazatelj istog.

Validnost dinamičkog ponašanja glavnih vretena kao dijagnostičkog parametra ispitivanih tehničkih sistema ogleda se i u činjenici da vrednosti ovog parametra verno prate promene stanja vezane za radne režime, materijale obrade, vreme eksplotacije i stanje elemenata uležištenja.

Ovaj rad predstavlja početni prilaz u projektovanju jednog dijagnostičkog sistema za održavanje prema stanju ispitivanih obradnih centara. Time se omogućava re-

šavanje jednog od objektivno najsloženijih zadataka koji se postavlja pred sistemom održavanja alatnih mašina, a koji se odnosi na određivanje njihovog stanja u toku vremena eksplotacije, pri čemu se u stvari, na osnovu kompleksnih merenja i analiza definiše radna sposobnost sistema.

## LITERATURA

- [1] JEREMIĆ M. B., *Terotehnologija: tehnologija održavanja tehničkih sistema*, Eskod, Kragujevac, 1992.
- [2] V. WOWK, *Machinery vibration: measurements and analysis*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1991.
- [3] MOBLEY K. R., *An introduction to predictive maintenance*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [4] WECK M., *Handbook of Machine Tools*, Vol. 3., Automation and Controls, A Wiley Heyden publication, New York, 1974.
- [5] N. MILIĆ, *Razvoj dijagnostičkog sistema za održavanje obradnih centara*, Magistarski rad, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1994.

## Dynamic Behavior of The Machining Centers Main Spindle

*Each machine tool represents a dynamic system, whose work is accompanied by enforced vibrations, and at certain regimes the self excited vibrations may appear. These vibrations also cause the unstable machine operation and have, as a consequence, the change of its state as the dynamic and cybematic system. This fact is used for diagnostics of these technical systems, through the vibrational behavior of the machine as a diagnostics parameter. Main spindles of machine tools in metal cutting represent the most important assembly which influences the total quality of the realized machine construction itself as well as the quality and accuracy of the machined surface. Monitoring of changes in the main spindles oscillatory behavior of the machining centers should enable identification of these systems states and planning of the type and volume of activities on the maintenance jobs.*

*In this paper is given the presentation of the measurements setup for monitoring the oscillatory behavior of the machining centers main spindles, as well as some of the obtained results. We analyzed results obtained in the form of the amplitude - frequency characteristics of the motion acceleration in the directions of three mutually perpendicular axes of the main spindles bearings housings. Obtained results are discussed from the aspect of obtained characteristic frequencies of oscillations, as well as different time periods of machining centers exploitation, and axes of vibrations. Also, we analyzed the obtained amplitude - frequency characteristics as functions of the main spindle rpm and machined piece material type.*

## Динамическое поведение шпинделя токарного станка, обрабатывающих систем

*Каждый металорежущий станок является динамической системой, рабочая которой сопровождается вынужденными колебаниями. При определенных режимах работы вместе с ними могут возникнуть и самовозпроизвольные колебания. Колебания эти оказывают неблагоприятное воздействие на устойчивость работы станка, что в свою очередь вызывает изменение кинематического и динамического состояния. Этот факт служит параметром диагностики при определении состояния машины. Шпинделы токарного станка являются важнейшим узлом, определяющим общее качество построенной конструкции самого станка, и качество и точность обработанной поверхности. Наблюдение за изменением колебательного поведения шпинделей должно позволить определение состояния системы и планирование вида и объема ее обслуживания.*

*В настоящей работе показана измерительная цепь для наблюдения колебательного поведения шпинделей токарного станка, обрабатывающих систем, вместе с некоторыми из полученных результатами. Авторами проведён анализ данных, полученных в виде амплитудно-частотных характеристик ускоренного движения, в трёх взаимно перпендикулярных осях корюса обороты шпинделей токарных станков. Полученные результаты проанализированы в аспекте частотных характеристиках различных периодах эксплуатации, и в различных осях колебания. Кроме того, проведён анализ амплитудно-частотных характеристик с точки зрения числа оборотов шпинделя и сорта обрабатываемого материала.*