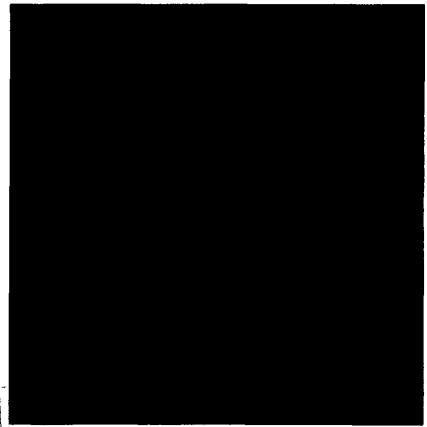
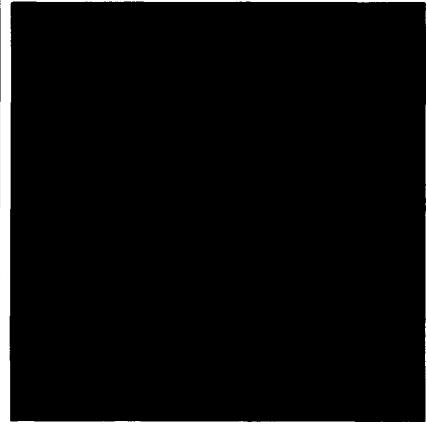
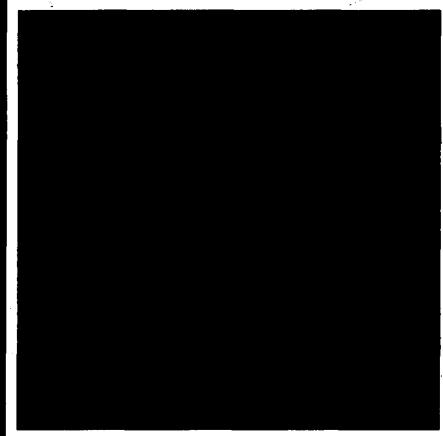
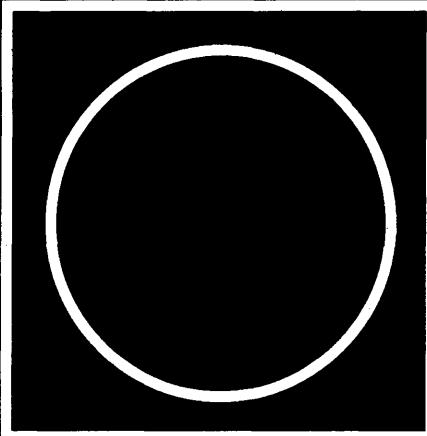
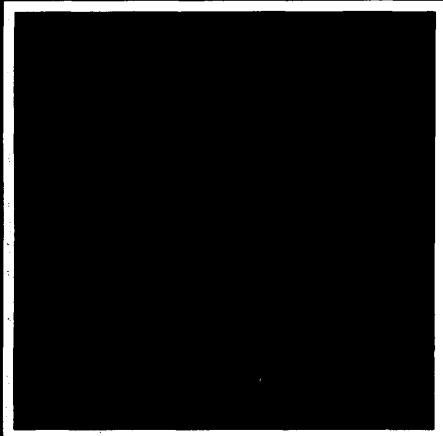


tribologija u industriji

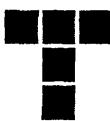
tribology in industry ◊ трибология в промышленности

YU ISSN 03551 - 1642
GODINA XVI
SEPTEMBAR 1994

3



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



tribologija u industriji

tribology in industry ◊ трибология в промышленности

sadržaj



contents



содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ВВЕДЕНИЕ

B. IVKOVIĆ: EUROMETALWORK'94 - Internacionalna konferencija o tribologiji obradnih procesa ◊ EUROMETALWORK'94 - International Conference on Tribology of Machining Processes ◊ EUROMETALWORK'94 - Междинардна конференция по трибологии процесов обработки 71

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

R. NIKOLIĆ: Damage Due to Spark Cutting in Copper Single Crystals ◊ Оштећење при сечењу варним монокристалом бакра ◊ Повреждения при искровой резке монокристаллов меди 73

D. MILIKIĆ, M. GOSTIMIROVIĆ: Uticaj kinematskih i geometrijskih parametara procesa brušenja na visinu temperaturu rezanja ◊ Influence of Tribological and Geometrical Parameters of The Grinding Process on The Magnitude of The Cutting Temperature ◊ Воздействие кинематических и геометрических параметров процесса шлифования на температуру резания 77

J. VLADIĆ, B. SOVILJ: Tribološke karakteristike prenosa snage putem trenja kod specifičnih transportnih mašina ◊ Influence of Tribological and Geometrical Parameters of The Grinding Process on The Magnitude of The Cutting Temperature ◊ Воздействие кинематических и геометрических параметров процесса шлифования на температуру резания 85

ARSOVSKI, M. BABIĆ, B. JEREMIĆ, B. VASILJEVIĆ:
Simulation Model for Application of Contact Layers Modification Procedures ◊ Tribološke karakteristike prenosa snage putem trenja kod specifičnih transportnih mašina ◊ Трибологические характеристики передачи мощности трением в специфических трибологических машинах 94

NOVOSTI
NEWS
ИЗВЕСТИЯ

. 99

KNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ

. 102

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ

. 104

B. IVKOVIĆ

EUROMETALWORK'94

- Internacionalna konferencija o tribologiji obradnih procesa

Internacionalna konferencija o tribološkim procesima u obradi metala rezanjem i deformisanjem održana je od 28. Septembra do 1. oktobra 1994. godine u Udinama - Italia u organizaciji Nacionalnog Centra za Tribologiju iz Milana. Direktor ovog Centra Prof. dr E. Cosmacini bio je domaćin ovog skupa u svojstvu predsednika organizacionog i naučnog komiteta.

Konferencija je održana u prostorijama Univerziteta u Udinama u prijatnom ambijentu uz organizovani celodnevni boravak svih učesnika. To je omogućilo ostvarivanje brojnih kontakta između učesnika iz 23 zemlje među kojima se nalazila i Jugoslavija.

Program konferencije podeljen je u četiri dela. U prvom delu programa saopšteni su radovi iz oblasti tribologije rezanja, koji su se odnosili na oba čvrsta elementa tribomehaničkog sistema (predmet obrade i alat) u kome se procesi rezanja ostvaruju. Pored teorijskog razmatranja procesa deformisanja materijala u kontaktnim slojevima alata i predmeta obrade pri rezanju, koje je izložio N. B. Demkin, posebnu pažnju privuklo je saopštenje B. Mills-a sa Univerzi-

teta u Liverpool-u, koje se odnosilo na razvoj alatnih materijala, ali i na predviđanja promena u materijalima elemenata mašina i transportnih sredstava. Najveći broj radova iz ovog dela programa konferencije odnosili su se na proces rezanja sa alatima od keramičkih materijala i alatima sa tribološkim prevlakama. Mogućnost zamene brušenja struganjem keramičkim alatima razmatrana je u radu grupe autora sa Univerziteta u Hanoveru. Saopšeno je mišljenje da obrada struganjem tvrdih materijala predmeta obrade alatima od CBN-a (polikristalni cubni nitrid bora) i poboljšanim alatima od tvrdog metala i keramike može da se postigne veća produktivnost obradnih procesa i manji troškovi obrade.

Drugi deo programa konferencije odnosio se na tribološke procese u obradi deformisanjem. Saopšteno je 17 radova, najviše iz oblasti kovanja i hladnog istiskivanja, ali je bilo i radova iz oblasti dubokog izvlačenja, odnosno obrade lima.

U trećem delu programa saopšteno je 18 radova o trećem elementu tribomehaničkih sistema u kojima se realizuju obradni procesi, odnosno o

sredstvima za hlađenje i podmazivanje. Istaknut je značajan napredak u poboljšanju triboloških svojstava savremenih sredstava za hlađenje i podmazivanje, ali i ukazano na neophodnost većeg korišćenja komponenti biljnog i životinjskog porekla za njihovu proizvodnju. Ovo je bitno da bi se poboljšao ekološki aspekt primene sredstava za hlađenje i podmazivanje u proizvodnim procesima. U oblasti razvoja komponenti biljnog i životinjskog porekla za poizvodnju sredstava za hlađenje i podmazivanje izgleda da se veoma mnogo radi u istraživačkim institucijama Rumunije, Italije i Finske.

Grupa interesantnih radova opšteg karaktera, iz oblasti tribologije rezanja, saopštена je u četvrtom delu programa konferencije. O problematici proračuna habanja i razvoju modela proračuna zasnovanog na analizi procesa u kontaktним slojevima na mesascopic nivou govorio je direktor Tribološkog centra iz Samare, Rusija. Učešće saradnika ovog Centra na ovoj konferenciji, kao i na drugim tribološkim skupovima internacionalnog karaktera održanih u poslednje vreme (Sofija, Krakov i dr), bilo je zapaženo kako po broju

učesnika tako i po sadržaju saopštenih radova. U ovom delu programa konferencije saopšteni su i radovi iz oblasti statističke analize hrapavosti površina i o mogućnostima korišćenja vibracija za razvoj metoda ispitivanja materijala elemenata tribomehaničkih sistema.

U odnosu na ranije godine učešće naučnih radnika iz Rusije na ovoj konferenciji bilo je izrazito brojno. Njihova saopštenja ukazuju na intenzivan rad u oblasti tribologije i to ne samo teorijskog karaktera već i eksperimentalnog u velikom obimu. Nekada zatvorene institucije u obla-

stima koje nisu bile dostupne strancima (Vazduhoplovni tehnološki institut, Rybinsk, na primer) sada se pojavljuju sa zapaženim rezultatima istraživanja i iz oblasti tribologije. Predloženo je da se sledeći EUROMETALWORK održi u Samari, koja je oko 1000 km udalena od Moskve i koja je za njihove pojmove veoma blizu evropskim zemljama.

Na okruglom stolu, koji je bio organizovan za vreme trajanja konferencije, najviše je bilo govora o ekološkom aspektu primene sredstava za hlađenje i podmazivanje i o neophodnosti da se ovom problemu posveti u

budućnosti mnogo veća pažnja nego što je to činjeno do sada. Jedan od načina poboljšanja ekološkog aspekta primene sredstava za hlađenje i podmazivanje je stvaranje uslova za povećanje njihovog veka trajanja odnosno za smanjenje njihove potrošnje. Ukazano je na postojanje velikih mogućnosti smanjenja potrošnje sredstava za hlađenje i podmazivanje kroz primeni uređaja za optimalnu pripremu emulzija i rastvora i skimera za uklanjanje istrošenih ulja sa njihove površine u rezervoarima alatnih mašina.

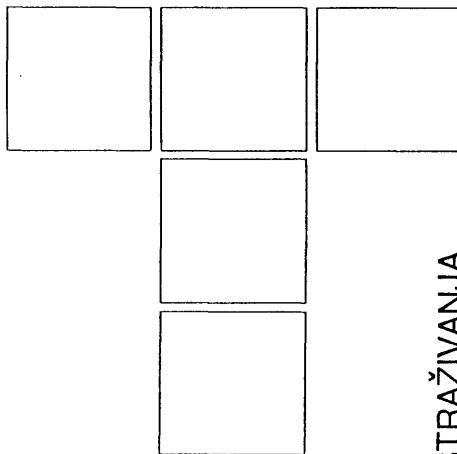
EUROMETALWORK'94

- International Conference on Tribology of Machining Processes

International conference from the field of machining process tribology EUROMETALWORK'94 which was held in Udine, Italia from September 28. till October 1. 1994., has gathered more than 200 scientists from 23 countries. 80 papers were presented from the field of tribology of machining by cutting and deformation. Special attention was devoted to coolants and lubricants as the third element of the tribomechanic system in which the machining processes are realized. Presented were results of research of tribological characteristics of new materials for tools and machinability properties of new materials for working pieces. A certain number of presentations considered possible approaches to development of new methods for computations of wear.

EUROMETALWORK'94 - Меджународна конференција по трибологији процесов обрадотки

На международной конференции по трибологии процессов обработки ЕУРОМЕТАЛВОРК'94, состоявшейся в городе Удине в Италии, собралось свыше двухсот научных работников из двадцати стран. Они изложили восемьдесят научных сообщений по трибологии обработки резанием и обработки деформированием. Особое внимание было посвящено средствам охлаждения и смазки как третьему элементу трибомеханических систем в которых осуществляются процессы обработки. Были сообщены результаты исследования трибологических характеристик новых материалов инструментов как и особенностей обрабатываемости новых материалов обрабатываемых предметов. В определенном числе сообщений рассматривали возможные подходы развитию новых методов расчета изнашивания.



R. NIKOLIĆ

Damage Due to Spark Cutting in Copper Single Crystals

ISTRAGIVANJA

1. INTRODUCTION

In metal machining, and also in experimental work, there is always a need for some cutting of metal materials to desired dimensions and shapes. There are numerous methods for cutting, and which one will be applied depends upon a large number of factors, like kind of material, desired speed of obtaining smaller pieces, available equipment, quality of cut surface, and others. There is, though, a general tendency towards the precision in cutting, and above all, towards as small as possible, damaged layer on the cut surfaces. This provides adequate - desired dimensions of the cut piece, and of course, saves material. One of the most widely used methods for metal cutting is the spark cutting procedure. It satisfies both mentioned requirements. It is specially convenient for cutting in the laboratory conditions, for obtaining different sizes and shapes of "final" pieces. i.e., specimens to be used in various experiments.

2. SPARK CUTTING PROCEDURE

The schematic of the spark cutting machine setup is shown in Figure 1. The piece of metal that is cut, 1, is, together with the blade, 2, which is fixed into the holder, 3, submerged into the electrolytic fluid, 4. The piece and the blade are electrodes between which the spark occurs in the electrolyte, erodes the material of the piece and thus performs the cutting operation. As an example for cutting a piece where very fine surface is needed here are given some data on cutting the copper single crystal,[1]. The blade is made of brass and the electrolyte is kerosene. The crystal piece is glued with duco cement mixed with graphite powder into a brass jig. The graphite is used

to provide conductivity, and duco cement is dissolved with acetone after the cutting. The brass blade of thickness approx. 0.75 mm (0.03 inches) is descending towards the piece under the action of the servo-motor in the machine with the slowest possible speed. For cutting one piece of copper single crystal approximately 1.25 cm (0.5 inch) thick the necessary time was between 8 and 10 hours. For cutting the single crystals of Fe-Si alloy the blade is made of copper-tungsten alloy and the cutting time is longer for about one third.

3. DAMAGE DUE TO SPARK CUTTING

The spark cutting is usually considered as the most strain - free method of metal cutting, which produces the least damage to the cut piece. It still introduces considerable damage into the material. The spark cutting primary plane was, after the cutting so irregular that it had to be electropolished prior to etching which should reveal dislocations. The damage further from the surface can be determined by alternately polishing and etching the crystal.

Polishing of copper was done electrolytically in the solution consisting of 60 % of orthophosphoric acid and 40 % of distilled water,[2]. The polishing rate was 5 microns per minute. It could also be done chemically,[3]. After polishing the surface was etched. It should be emphasized that for revealing dislocations on different crystallographic planes of copper single crystals, different etchants have to be applied. For instance for the [111] planes the Livingston etchant is applied,[4], while for the[100] planes this etchant was modified by Young, [5]. Also, the solution which is right for particular orientation will work:, i.e., will reveal dislocation pits only in a very narrow angle range. If the crystal plane is more than 3 to 5 degrees off of the required orientation the etchant

Doc. dr Ružica R. Nikolić, dipl. ing.
Faculty of Mechanical Engineering Kragujevac

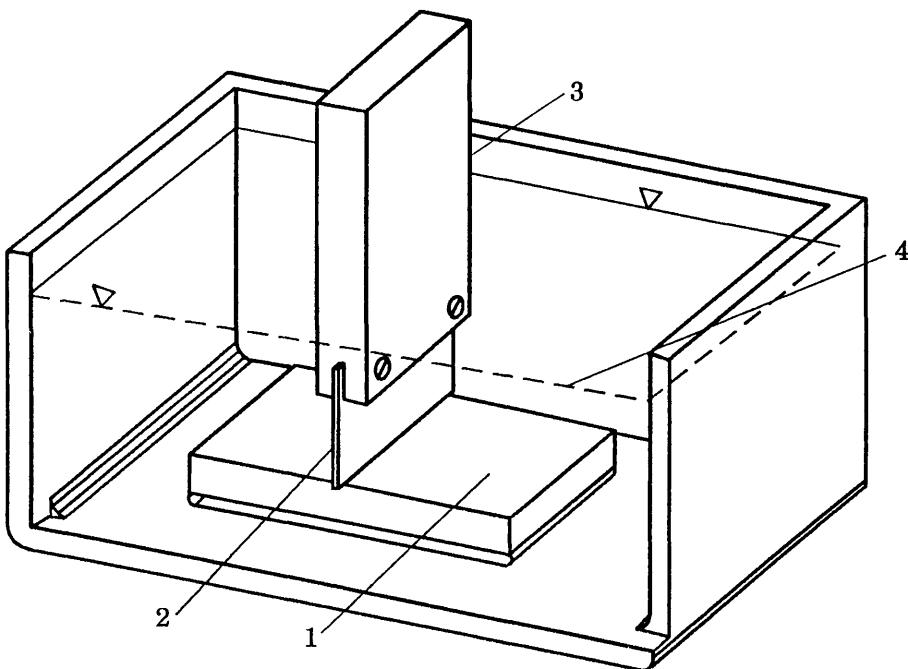


Fig. 1. Sketch of the spark cutting machine setup

1 - Working piece (Cu single crystal +), 2 - Blade (Brass -), 3 - Blade holder, 4 - Kerosene.

Slika 1. Skica uredjaja za sečenje varnicom
1 - Radni komad (Monokristal bakra +), 2 - Oštrica (Mesing -), 3 - Držać oštice, 4 - Kerozin.

Эскиз установки для резания искрой
1 - Заделка (монохристиалл меди +),
2 - лезвие (латунь -), 3 - оправка лезвия,
4 - керосин

will not reveal the dislocation pits. This points to importance of accurate determination of crystal planes orientation (for instance by Laue back scattering procedure [6]) and extreme importance of precise positioning of the crystal piece during the cutting.

Figure 2 shows the etch pit density versus depth from the surface. The density of the pits is falling with increasing distance from the surface (depth) and at about 0.7 mm it is 1×10^5 per cm^2 , which was approximately the density prior to cutting. This shows that the damage due to spark cutting extends all the way to 0.7 mm from the surface. [7].

The depth of damage was also measured after the spark cutting by etching the cross plane, [7]. The etch pits density decreased in the same way as on the primary plane. This implies that the initial dislocation density of the crystal is the same whether measured on the primary or cross planes.

Figure 3 shows the sequence of micro graphs made at different depths from the surface (at 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.7 mm) according to data from Figure 2. Near the cut surface the damage consisted of a cell structure of dislocations breaking down with increasing distance from the

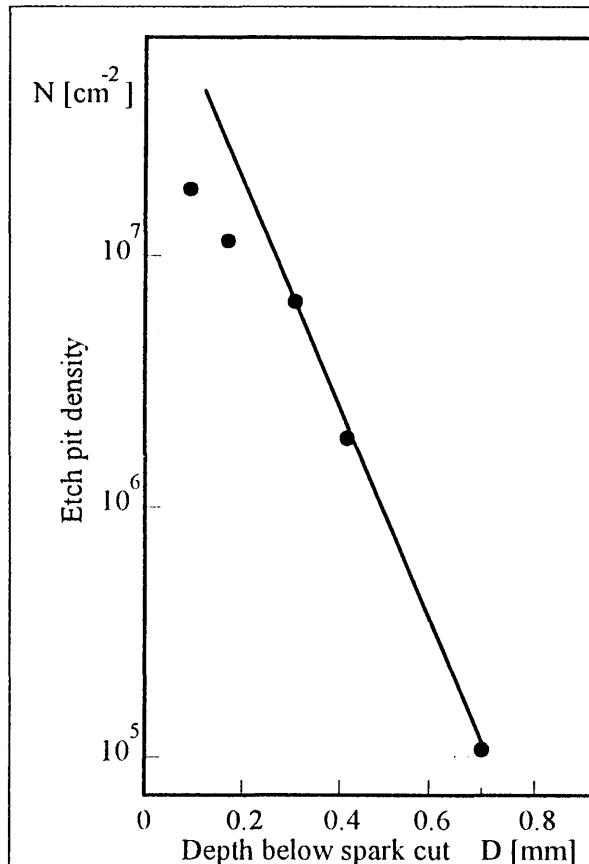


Fig. 2. Relation between etch pit density on primary plane and distance below the cut [7]

Veza izmedju gustine graviranih kratera dislokacija na primarnoj ravni i rastojanja ispod preseka [7]

Взаимозависимость частоты лунок дислокаций на первичной плоскости и расстояния под сечением [7]

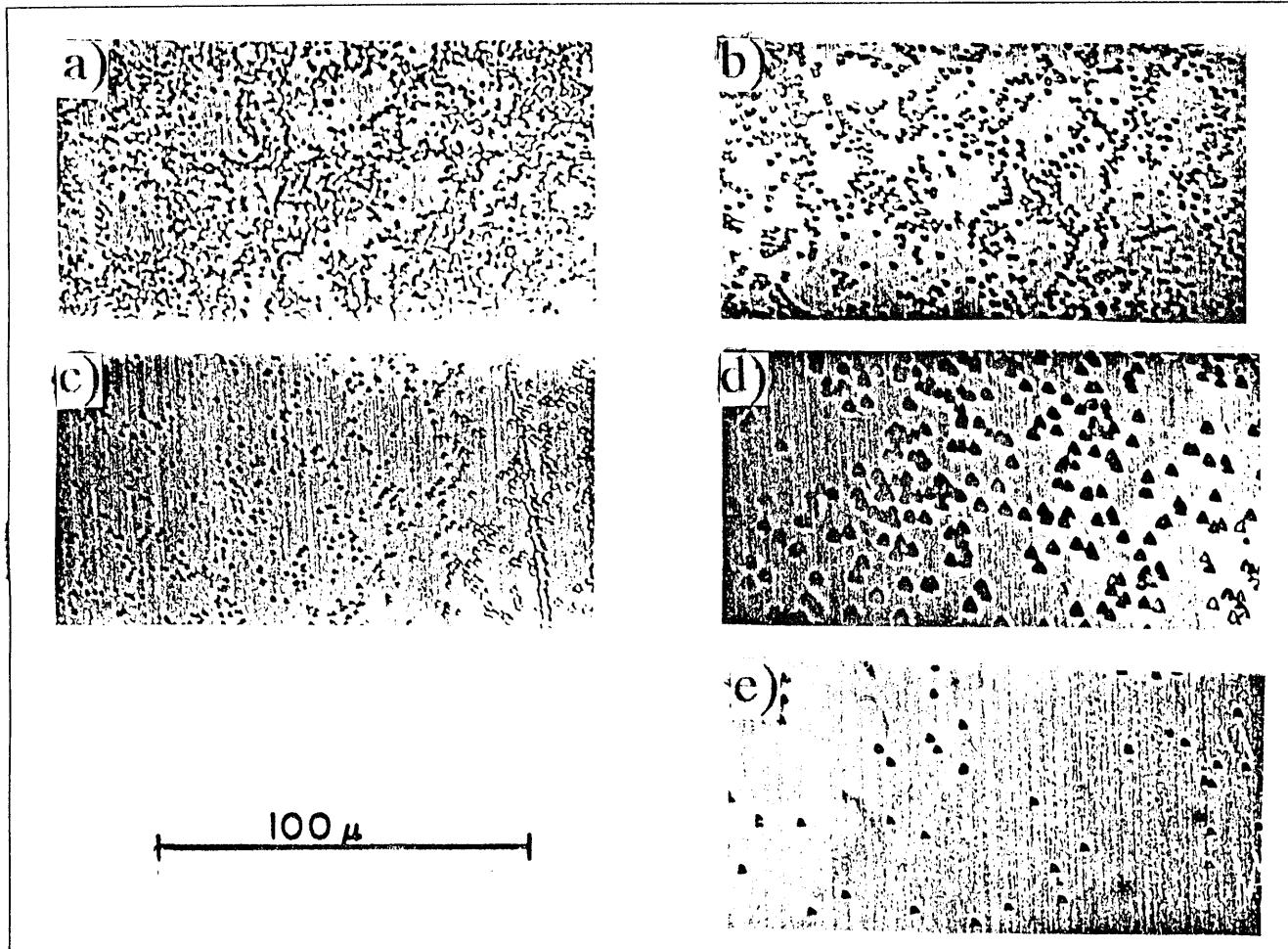


Figure 3. Etch pits at successive depths below the spark-cut primary plane.

a) 0.1 mm; b) 0.2mm; c) 0.3 mm; d) 0.4 mm; e) 0.7mm; [7]

Gravirani krateri na sukcesivnim dubinama ispod primarne ravni sečenja varnicom.

a) 0.1 mm; b) 0.2mm; c) 0.3 mm; d) 0.4 mm; e) 0.7mm; [7]

Лунки на последовательных глубинах под первичной плоскостью резки искрой

a) 0.1 мм; б) 0.2мм; в) 0.3 мм; д) 0.4 мм; е) 0.7мм; [7]

cut toward the isolated - pit density characteristic of the virgin material.

4. CONCLUSION

Although the spark cutting method is considered as the most strain - free method of metal cutting it still introduces considerable damage into the material. Here is considered damage introduced into the copper single crystal. It is determined that the damage goes as far as 0.7 mm deep into the material, and only at that depth the dislocation etch pits density falls down to 1×10^5 per cm^2 , which is the density prior to cutting. It is also established that the pits density behaves the same on the cross plane. This implies that the initial dislocation density of the crystal is the same whether measured on the primary or cross planes.

This work was partially financially supported by Mathematical Institute of Serbian Academy of Sciences, Belgrade.

REFERENCES

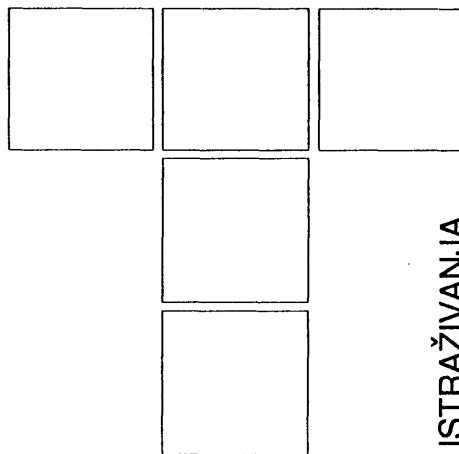
- [1] NIKOLIĆ, R. R., "Experimental Study of Crack Tip Processes and Plastic Flow in Ductile Crystals", Ph. D. Thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA, January, 1989.
- [2] SMITHELS, C. J., "Metals Reference Book", Interscience Publishers Inc., New York, 1955.
- [3] LOVEL, L. C., and J. H. WERNICK, *Journal of Applied Physics*, Vol. 30, No. 4, pp. 590 - 592, April 1959.
- [4] LIVINGSTON, J. D., *Journal of Applied Physics*, Vol. 31, No. 6, pp. 1071 - 1076, June 1960.
- [5] JOUNG, F. W. Jr., *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, No. 10, pp. 1815 - 1820, October 1961.
- [6] CULLITY, B. D., "Elements of X - Ray Diffraction", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, 1978.
- [7] BRYDGES, W. T. III, "The Early Stages of Plastic Flow in Copper", Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, October, 1966.

Oštećenje pri sečenju varnicom monokristala bakra

U obradi metala primjenjuju se različiti postupci sečenja. Postupak sečenja varnicom se uveliko koristi pri sečenju u laboratorijskim uslovima pošto se smatra za postupak koji uvodi najmanje deformacije u materijal, kao i da obezbeđuje vrlo tačne dimenzije sečenog komada. U ovom radu se razmatra oštećenje koje se ovim postupkom unosi u monokristal bakra. Utvrđeno je da oštećenje uopšte nije zanemarljivo, i da se prostire sve do dubine od 0.7 mm u kristal. Oštećenje se prikazuje preko gustine graviranih kratera dislokacija na različitim dubinama od površine. Takođe je ustanovaljeno da je gustina kratera, to jest oštećenje, jednakna na primarnoj i poprečnoj ravni kristala.

Повреждения при искровой резке монокристаллов меди

При обработке металлов применяются различные способы резки. Резка искрой широко используется при резании в лабораторных условиях благодаря этому, что её считают способом обработки вызывающим наименьшую деформацию материала и обеспечивающим высокую точность получаемой заготовки. В настоящей работе рассматриваются повреждения, вызываемые этим методом обработки в монокристаллах меди. Исследования показали, что повреждения проходят до 0.7 мм в глубь кристалла. Повреждение проявляется через количество лунок дислокаций на разных глубинах обеих поверхностей. Установлено также, что частотность повреждений одинакова на первичной и вторичной плоскостях кристалла.



D. MILIKIĆ, M. GOSTIMIROVIĆ

Uticaj kinematskih i geometrijskih parametara procesa brušenja na visinu temperatura rezanja

ISTRAŽIVANJA

1. UVOD

Brušenje se ubraja među najvažnije postupke za obradu tvrdih i teško obradljivih materijala. Njime se mogu postići visoke tačnosti obrade i kvalitet obrađene površine (klasično brušenje), ali i visoka produktivnost obrade (visokoučinsko brušenje), koja je ponekad ravna produktivnosti drugih postupaka obrade skidanjem strugotine (struganje ili glodanje).

U uslovima delovanja visokih pritisaka i temperaturu, u zoni brušenja nastaju vrlo kompleksne uzajamne reakcije brusnih zrna, materijala obradka, strugotine, veziva, SPH-sredstva i atmosfere. Ove reakcije, koje su najčešćim delom nedovoljno razjašnjene, a delom i pogrešno objašnjene, po pravilu dovode do niza veoma štetnih promena na obradku i točilu.

Za kvalitetnu primenu svih vrsta brušenja potrebno je poznavati njegove prednosti i posedovati određena teorijska i praktična znanja. U tom smislu veoma je značajno poznavanje uticaja kinematskih i geometrijskih parametara procesa brušenja na razvoj i distribuciju toplotne energije, odnosno na visinu nastalih temperatura rezanja.

*Prof. dr Milikić dr Dragoje, dipl.ing.,
Mr Gostimirović Marin, dipl.ing.,
Institut za proizvodno mašinstvo, FTN,
Novi Sad, V. Perića - Valtera 2.*

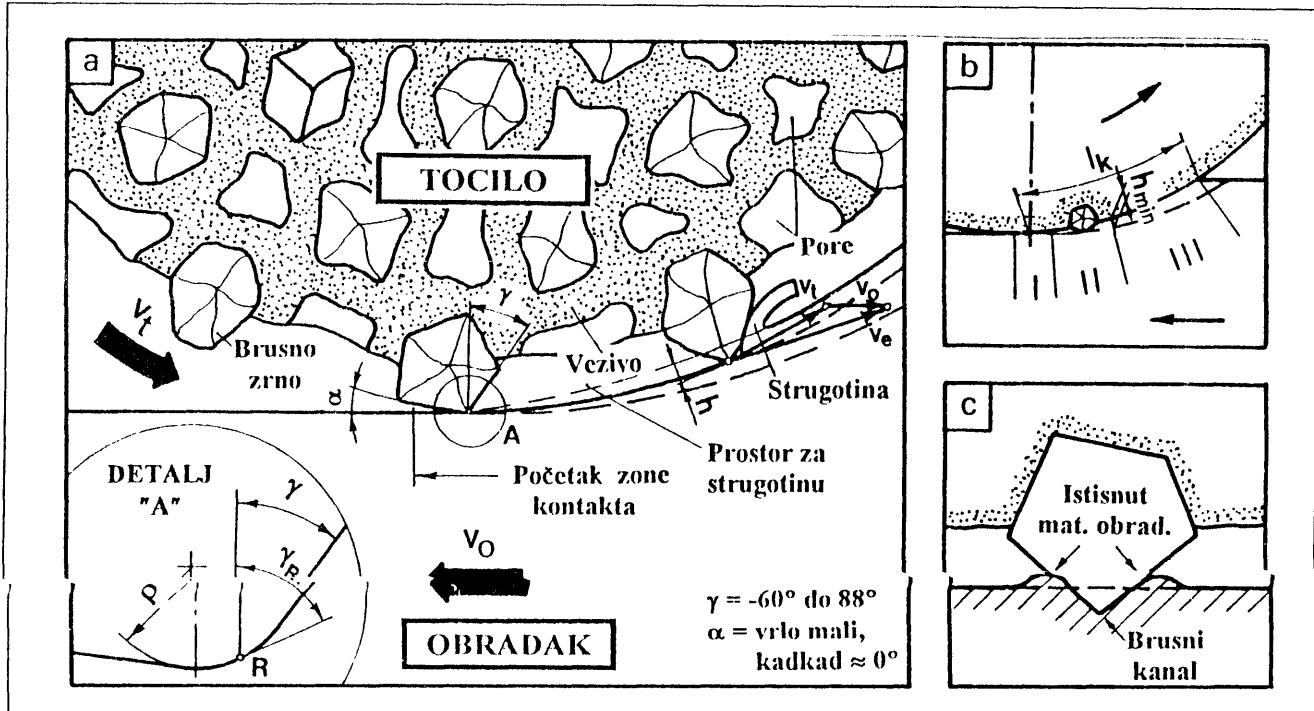
2. MEHANIZMI REZANJA PRI BRUŠENJU

Proces rezanja pri brušenju bitno se razlikuje od drugih postupaka obrade sa definisanom geometrijom sečiva, kao što su struganje ili glodanje. Ove razlike prouzrukuje pre svega mikrostruktura rezne površine točila, koju sačinjavaju geometrijski potpuno nedefinisana brusna zrna i međuprostori od veziva i pora. Uz to se rezanje odvija znatno većim brzinama, koje u ovom trenutku praktično dostižu vrednosti od cca 125 m/s .

Brušenje se odvija tako što se veliki broj brusnih zrna nalazi istovremeno u zahvatu sa obradkom, a ukupna količina skinutog materijala - proizvodnost dobija se zbrajanjem mikro strugotina koju skida svako aktivno brusno zrno ponaosob. Iako se mehanizmi obrazovanja strugotine pojedinih brusnih zrna međusobno razlikuju, ipak se može izdvojiti prosečna geometrija brusnih zrna i na njoj opisati opšti mehanizam rezanja pri brušenju.

Na slici 1-a dat je uvećan šematski prikaz zone rezanja točila na kojoj se vide brusna zrna, koja vrše rad rezanja, sredstvo za povezivanje brusnih zrna (vezivo) i pore koje služe za odvođenje strugotine, dovod SPH-sredstva i za regulisanje čvrstoće vezivnih mostića.

Pri rezanju aktivnih brusnih zrna *debljina strugotine* (h) se menja od nule do max. vrednosti, dok se istovremeno *efektivna brzina rezanja* (v_e) smanjuje od max. vrednosti, pri ulasku zrna u zahvat, do min. vrednosti pri njegovom izlasku iz zahvata (slika 1-a). Debljina strugotine i efektivna brzina rezanja su dva najvažnija parametra koji utiču na proces rezanja pri brušenju.



Slika 1. Šematski prikaz zone rezanja tocila (brusnih zrna)
Schematic representation of the cutting zone of the grinding wheel (granule).
Схема зоны резания шлифовального круга

Proces delovanja zrna na dužini kontakta (l_k) može se uslovno podeliti na tri karakteristične faze, I-III na slici 1-b. U prvoj fazi prodiranja zrna u materijal obradka dolazi samo do elastičnog deformisanja materijala. U drugoj fazi se ostvaruje plastična deformacija i tećenje materijala. Obzirom na postojanje zaobljenja sečiva zrna (vidi detalj "A" na slici 1), ugao između konture zrna i površine obradka u početku je vrlo mali (zbog male debljine strugotine γR je veliko), tako da se u ovoj fazi ne obrazuje strugotina već se materijal obradka samo bočno istiskuje i/ili teče ispod sečiva prema leđnoj površini zrna (ostvaruje se gnjećenje materijala), slika 1-c. Druga faza traje sve dok zrno ne prodre do određene dubine (h_{min}) u obradak, kad počinje stvarno obrazovanje strugotine, što se karakteriše kao treća faza. U ovoj fazi istovremeno nastaje proces istiskivanja materijala i obrazovanja strugotine. Koliko materijala obradka će prelaziti u strugotinu (poželjno je da bude što više), a koliko će biti samo utisnuto, zavisi od geometrije brusnih zrna i efektivne brzine rezanja (v_e).

Pored elastičnog i plastičnog deformisanja, sve tri faze rezanja brusnih zrna praćene su i velikim trenjem između površina zrna i materijala obradka, a u II i III fazi još i unutrašnjim trenjem u materijalu obradka. Zbog toga se može tvrditi da je proces brušenja u velikoj meri i tribološki proces, pa se određene pojave koje ga prate mogu razmatrati i sa tog stanovišta.

Na osnovu prethodno opisanih mehanizama, koji mogu da variraju od zrna do zrna, može se zaključiti da proces

rezanja pri brušenju predstavlja mešavinu između produktivnog rezanja (obrazovanje strugotine) i neproduktivnog brazdanja (paranja) površine obradka.

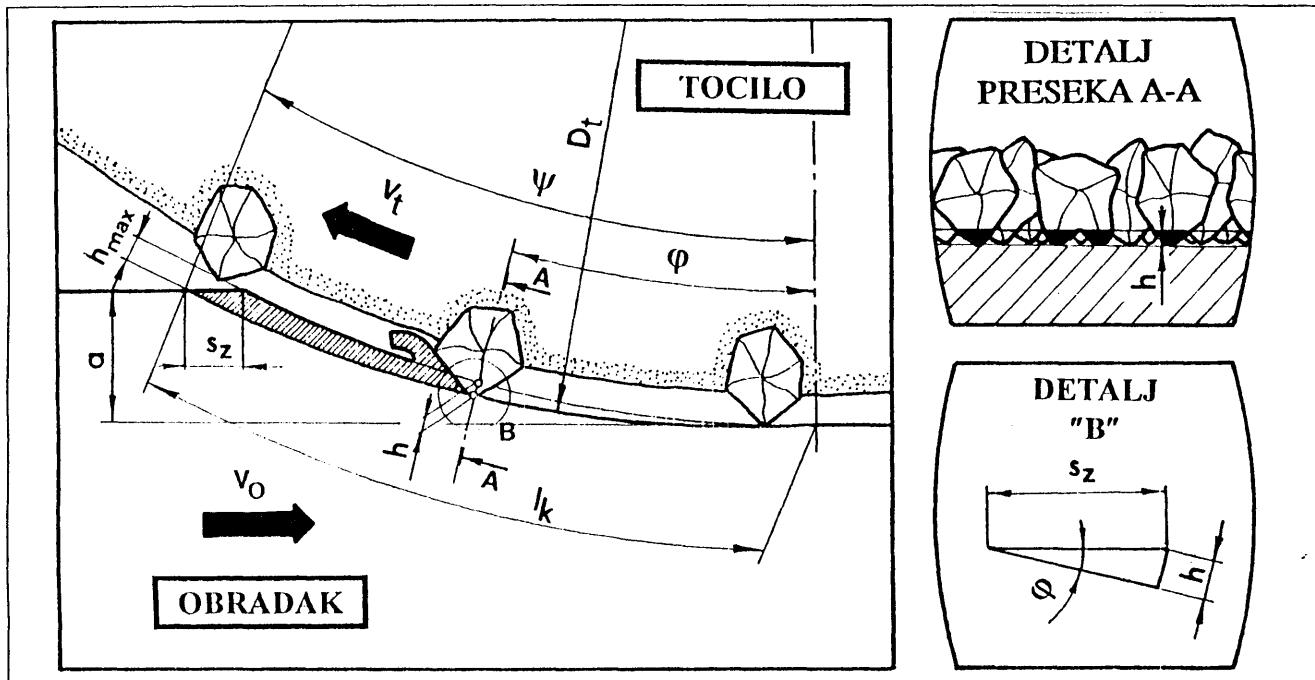
3. KINEMATSKI I GEOMETRIJSKI PARAMETRI PROCESA BRUŠENJA

Kretanje brusnih zrna tocila u procesu rezanja definiše se preko kinematskih i geometrijskih parametara koji su šematski prikazani na slici 2.

Kinematske parametre sačinjavaju: obimna brzina tocila v_t (m/s)¹⁾, brzina obradka v_o (m/min), odnosno njihov odnos $q = v_t/v_o$. Nadalje, kinematske parametre čine i pomaci: aksijalni s_a (mm/ob) - kod kružnog spoljašnjeg i unutrašnjeg brušenja, bočni s_b (mm/hod) - kod ravnog brušenja i radikalni s_r (mm/ob) - kod radikalnog brušenja.

Geometrijski parametri se dele na makro i mikro parametre, zavisno od veličine koju ostvaruju u procesu rezanja. U makro parametre spadaju prečnik tocila D_t (mm), prečnik obradka D_o (mm), dubina rezanja a (mm) i dužina kontakta zrna sa obradkom l_k (mm). Mikro geometrijski parametri procesa brušenja su vezani za dimenzije nedeformisane strugotine koju skida jedno brusno zrno, a to su: trenutna h (mm/m), maksimalna h_{max} ($mm/\mu m$) i srednja h_m ($mm/\mu m$) debljina strugotine.

Pošto su neki geometrijski parametri strugotine veoma važni za analizu procesa brušenja, to ćemo ih ovde nešto detaljnije razmotriti.



Slika 2. Prikaz kinematskih i geometrijskih parametara pri obradi brušenjem
Representation of the kinematic and geometrical parameters in machining by grinding.
Изображение кинематических и геометрических параметров при обработке шлифованием

Dužina kontakta

Ovde se posmatra geometrijska dužina kontakta koja se definije kao rastojanje koje aktivno zrno pređe od momenta kontakta sa obradkom do izlazka iz kontakta, sl. 2.

Koristeći čisto geometrijske odnose pri brušenju, za uslove statičkog kontakta, dolazi se do sledećeg izraza za geometrijsku dužinu kontakta zrna sa obradkom:

$$l_{kg} = \sqrt{a \cdot D_{te}} \text{ (mm)}^2 \quad (1)$$

gde je: D_{te} - ekvival. preč. tocila;
(+) spoljašnje, (-) unutrašnje brušenje;
 $D_{te}=D_t$ - za ravno brušenje.

Pored geometrijske razlikujemo još i kinematsku dužinu kontakta, koja se izvodi na osnovu parametarskih jednačina trajektorije zrna i ona iznosi:

$$l_{kk} = \frac{t_o \cdot v_o}{2 \cdot v_t} + \frac{v_o}{v_t} \cdot l_{kg} + l_{kg} \quad (2)$$

gde je t_o (mm/ μm) - rastojanje (korak) brusnih zrna.

Obzirom da prva dva člana jednačine (2) imaju relativno malu vrednost, to je razlika između geometrijske i kinematske dužine kontakta praktično zanemarivo mala.

Vezano sa dužinu kontakta je vreme obrazovanja strugotine, odnosno vreme zahvata zrna sa obradkom koje iznosi:

$$t_z = \frac{l_{kg}}{v_t} = \frac{\sqrt{a \cdot D_{te}}}{v_t} \text{ (s)} \quad (3)$$

Debljina strugotine

► Trenutna debljina nedeformisane strugotine prema slici 2 - detalj "B" iznosi:

$$h = s_z \cdot \sin \varphi \text{ (mm/ μm)} \quad (4)$$

Ovde je s_z pomeranje obradka (obrtno ili translatorno) za vreme rezanja jednog brusnog zrna (tzv. pomak po zrnu) i može se odrediti iz sledećeg uslova:

$$t_z = \frac{\sqrt{a \cdot D_{te}}}{v_t} = \frac{s_z}{v_o},$$

odnosno:

$$s_z = \frac{v_o}{v_t} \cdot \sqrt{a \cdot D_{te}} \text{ (mm/ μm)} \quad (5)$$

► Maksimalna debljina strugotine koju reže jedno brusno zrno dobija se iz uslova da je $\phi = \psi$, slika 2. Ugao ψ se određuje korišćenjem geometrijskih parametara procesa brušenja, tako da se dobija:

$$\sin \psi \approx 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{D_{te}}} \quad (6)$$

Zamenom jednačine (5) i (6) u jednačinu (4) i nakon sređivanja izraza dobijamo:

$$h_{\max} = 2 \cdot \frac{v_o}{v_t} \cdot a \text{ (mm/ μm)} \quad (7)$$

Srednja debljina strugotine je zamišljena debljina strugotine koju bi u svakom trenutku rezala aktivna brusna zrna u zahvatu sa obradkom.

Srednja debljina strugotine se može dobiti tako što se zapremina V_k (mm^3) koju režu aktivna brusna zrna raspoređena po širini zahvata (b_k) - vidi detalj preseka A-A na slici 2., od momenta ulaska u zahvat sa obradkom do izlaska iz zahvata (oblik zakrivljene trostrane prizme), izjednači sa zapreminom paralopipeda iste osnovice (površin i zahvatnog luka $A_k = l_k \cdot b_k$) i visine h_m , odnosno:

$$V_k = \frac{l_k h_{\max}}{2} b_k = l_k b_k h_m (\text{mm}^3), \quad (8)$$

pa je:

$$h_m = \frac{h_{\max}}{2} = \frac{V_k}{l_k b_k} (\text{mm}/\mu\text{m}) \quad (8)$$

Ako se u prvu jednakost jednačine (8) zameni jednačina (7) dobije se prvi izraz za srednju debljinu strugotine koji glasi:

$$h_m = \frac{v_o}{v_t} \cdot a (\text{mm}/\mu\text{m}) \quad (9)$$

Drugi izraz za srednju debljinu strugotine, koji je pogodniji za praktičnu primenu, dobija se korišćenjem druge jednakosti jednačine (8). Naime, proširivanjem tog izraza sa t_z uz korišćenje jednačine (3), dobija se:

$$h_m = \frac{Z'}{v_t} (\text{mm}/\mu\text{m}) \quad (10)$$

U prethodnoj jednačini je $Z' = \frac{V_k}{b_k t_z}$ ($\text{mm}^3/\text{mm s}$) - zapremina strugotine redukovana na jedinicu širine kontakta tocila sa obradkom, odnosno specifična proizvodnost.

Jednačina (10) se lako može prevesti u jednačinu (9) korišćenjem izraza za Z' koji glasi:

$$Z' = a \cdot v_o (\text{mm}^3/\mu\text{m s}) \quad (11)$$

Srednja debljina strugotine se u literaturi pojavljuje pod različitim nazivima, npr. ekvivalentna debljina strugotine [1,2], teoretska debljina strugotine [3], trenutna debljina strugotine [4], redukovana debljina strugotine [3], koeficijent debljine strugotine [3] itd., ali i sa različitim definicijama od kojih su neke potpuno pogrešno izvedene.

Srednja debljina strugotine je parametar koji je vrlo pogodan za istraživanje veličina kojima se ocenjuje stanje procesa obrade brušenjem, kao što su: proizvodnost, komponente otpora rezanja, temperature rezanja, hraptavost površine i dr. Njome se uspostavljuju veze između ulaznih i izlaznih parametara procesa brušenja. Tako je ona postala važna karakteristika tocila, odnosno mera količine strugotine koju rezna površina tocila može normalno da prihvati bez štetnih posledica na obrađenu površinu i tocilo. Polazeći od te karakteristike tocila, može se izvršiti izbor parametara režima rezanja tako da jednačina (9), odnosno (10) budu zadovoljene za date uslove obrade.

4. ANALIZA UTICAJA KINEMATSKIH I GEOMETRIJSKIH PARAMETARA NA VISINU TEMPERATURA PRI BRUŠENJU

Od tri karakteristične temperature koje se javljaju pri brušenju [5,6], ovde se posmatra max. temperatura površinskog sloja obradka koja je rezultat istovremenog rezanja većeg broja zrna u zoni kontakta obradak-tocilo. Ova temperatura se obično naziva kontaktna temperatura Θ_k ($^{\circ}\text{C}$) i u uskoj vezi je sa efikasnošću odvođenja razvijene toplosti iz zone rezanja, odnosno sa defektima koji nastaju u površinskom sloju materijala obradka.

Visina maksimalne temperature površinskog sloja se u načelu definiše sa dva bitna parametra procesa, odnosno: jačinom toplotnog izvora i vremenom njegovog delovanja o kojima se detaljnije govori u nastavku.

Jačina toplotnog izvora

Svako brusno zrno pri rezanju predstavlja elementarni toplotni izvor, a zbrajanjem njihove jačine dobija se ukupna jačina toplotnog izvora koji deluje u zoni rezanja.

Jačina elementarnog toplotnog izvora Q_{1z} (J/zrnu) može se izraziti sledećom jednačinom:

$$Q_{1z} = F_{tz} \cdot v_t \cdot t_z (\text{J/zrnu}) \quad (12)$$

gde je: $F_{tz} = \frac{F_t}{N_a A_k}$ (N/zrnu) - tangencijalna sila rezanja jednog brusnog zrna;

F_t (N) - ukupna tangencijalna (glavna) sila rezanja;

N_a (zrna/mm^2) - aktivni broj zrna na jedinici površine tocila;

$A_k = l_k \cdot b_k$ (mm^2) - kontaktna površina obradak-tocilo.

Ukupna jačina toplotnog izvora u zoni rezanja iznosi bi, u skladu sa napred rečenim:

$$Q = Q_{1z} N_a A_k (J) \quad (13)$$

Zamenom jednačine (12) u jednačinu (13), uzimajući pri tome u obzir i izraz za F_{tz} , dobija se:

$$Q = F_t v_t t_z (J) \quad (14)$$

Pri brušenju se izlazni parametri procesa obično izjavaju u iznosu redukovanim na jedinicu širine zone kontakta b_k (mm), pa bi u tom slučaju jednačina (14) glasila:

$$Q' = F_t v_t t_z \quad (15)$$

gde je: $Q' = \frac{Q}{b_k}$ (J/mm) - specifična jačina toplotnog izvora;

$F'_t = \frac{F_t}{b_k}$ (N/mm) - specifična tangencijalna sila rezanja.

Sa druge strane, specifična tangencijalna sila rezanja se može izraziti opšte poznatom jednačinom oblika [4]:

$$F_t = k_{tm} \cdot h_m \quad (16)$$

U prethodnoj jednačini je k_{tm} (N/mm^2) - specifični tangencijalni otpor rezanja, koji je približno konstantan za određeni materijal obradka.

Zamenom izraza (9) u jednačinu (16) dobija se:

$$F_t = k_{tm} \cdot \frac{v_o}{v_t} \cdot a \quad (17)$$

Uzimajući u obzir jednačine (3) i (17), jednačina (15) dobija sledeći konačan oblik:

$$Q' = k_{tm} \cdot \frac{v_o}{v_t} \cdot a^3 \cdot 2 \cdot D^{-1} \cdot h_{te} \quad (J/mm) \quad (18)$$

Vreme delovanja topotnog izvora

Kad govorimo o vremenu delovanja topotnog izvora na površinski sloj obradka, onda razlikujemo:

- vreme delovanja elementarnih topotnih izvora pojedinih brusnih zrna tei (s) i
 - vreme delovanja ukupnog topotnog izvora cele zone rezanja tui (s).
- Vreme delovanja elementarnih topotnih izvora** utiče na količinu topote koja se iz zone rezanja odvodi u obradak, tako da duže delovanje elementarnog topotnog izvora povećava količinu topote koja odlazi u površinski sloj obradka i obrnuto. Ovo vreme je isto kao vreme zahvata zrna sa obradkom, jednačina (3), odnosno:

$$t_{ei} = \frac{\sqrt{a \cdot D_{te}}}{v_t} \quad (s) \quad (19)$$

Vreme delovanja ukupnog topotnog izvora takođe utiče na količinu topote koja se iz zone rezanja odvodi u obradak, kao i na brzinu kojom SHP dospeva na upravo oborušenu površinu i hlađi je. Ovo vreme je obrnuto proporcionalno brzini pomoćnog kretanja (brzina obradka) i može se simbolično izraziti na sledeći način:

$$t_{ui} = \frac{1}{v_o} \quad (s/m) \quad (20)$$

Analiza uticaja pojedinih parametara režima obrade na visinu max. temperature površinskog sloja slikovito je prikazana u tabeli 1. Pri tome smo se rukovodili pravilom da veća jačina topotnog izvora u zoni rezanja i duže vreme njegovog delovanja u principu daje i veće temperature rezanja i obrnuto.

Kao što se vidi iz tabele 1, kod uticaja brzine rezanja v_t na visinu kontaktne temperature Θ_k dolazi do neslaganja između teoretskog zaključka i eksperimentalnih rezultata, koja se mogu objasniti na osnovu sledećeg razmatranja.

Jačina topotnog izvora, jednačina (19), izvedena je pod pretpostavkom da svako brusno zrno skida idealnu debljinu nedeformisane strugotine koja odgovara njegovom zahvatu na dužini kontakta (l_k), slika 2. Međutim, u stvarnosti se proces rezanja jednog brusnog zrna, kako je opisano u tački 2., odvija u tri faze, pri čemu u I i II fazi praktično nema skidanja materijala već se ostvaruje samo njegovo plastično istiskivanje. Tek u III fazi nastaje stvarno obrazovanje strugotine, a uslov za početak te faze je da zrno dostigne debljinu nedeformisane strugotine h_{min} , slika 1-b. Povećanjem brzine rezanja smanjuje se debljina strugotine, jednačina (7), a to znači da mnoga zrna za vreme svog zahvata kasno ili uopšte ne dostižu debljinu h_{min} , odnosno da se I i II faza prodiranja zrna produžuju, a III skraćuje ili potpuno izostaje. Ovakva situacija, u kojoj obradak vrši prinudno pomoćno kretanje, a u zoni rezanja se ne skida odgovarajuća zapremina materijala, neminovno dovodi do porasta pritiska tocila na obradak, odnosno otpora i trenja čime se proizvodi znatno veća količina topotne energije nego inače.

Na osnovu prethodno iznetog razmatranja dolazi se do, na prvi pogled, apsurdnog zaključka, odnosno da se pri većim debljinama nedeformisane strugotine, koje odgovaraju manjim brzinama rezanja, troši manje mehaničkog rada za rezanje, odnosno da se razvija manje topotne energije, pa su i temperature manje.

Tabela 1: Pregled uticaja parametara brušenja na visinu max. temperature površinskog sloja

Parametar režima obrade koji se povećava	Jačina topotnog izvora j-na (18)	Vreme delovanja topotnog izvora		Kontaktna temperatura	
		t_{ei} (j-na 19)	t_{ui} (j-na 20)	teoretički	eksperimentalno
Brzina rezanja v_t (m/s) (obimna brzina tocila),	↓	↓	—	↑	φ[⇒↓]
Brzina pomoćnog kretanja v_o (m/min) (brzina obradka)	↑	—	↓	?	↓[↑]
Dubina rezanja a (mm)	↑	↑	—	↑	↑[↓]

Značenje simbola u tabeli: ↑ - parametar raste; ↓ - parametar opada; ⇒ - parametar ostaje nepromenjen
Slučajevi u zagradi [] su utvrđeni u manjem broju istraživanja.

Praktična ispitivanja su pokazala da debljina strugotine h_{min} zavisi od: geometrije brusnih zrna, ugla prodiranja zrna u materijal obradka, efektivne brzine rezanja, uslova trenja na brusnim zrnima i deformabilnih svojstava materijala obradka. Neki od navedenih faktora utiču na povećanje, a neki na smanjenje debljine strugotine h_{min} , tako da krajnji ishod određuje da li će u datim uslovima obrade biti više zastupljeno produktivno rezanje (faza III) ili neproductivno brazdanje površine obradka (I i II faza). Zavisno od toga imaćemo stvarnu jačinu toplotnog izvora koja više ili manje odstupa od teorijske, jednačina (18). Koliko će tako razvijene toplove iz zone rezanja dospeti do obradene površine i tu uticati na visinu kontaktne temperature, zavisi od koeficijenta toplotne provodljivosti materijala obradka i dubine brušenja (klasično ili duboko brušenje).

Tabela I takođe pokazuje da kod uticaja brzine pomoćnog kretanja v_o na visinu kontaktne temperature Θ_k postoji teoretska dilema koja se razrešava eksperimentalno, tako da u nekim slučajevima dolazi do smanjenja, a u nekim do povećanja kontaktne temperature. Ove razlike se mogu objasniti na osnovu sledećeg razmatranja.

Na visinu kontaktne temperature presudno utiče količina toplove koja se iz zone rezanja provođenjem odvodi u površinski sloj obradka. Zavisno od uslova pri obradi i fizikalnih svojstava materijala obradka, ona može da iznosi od 10 do 80% ukupno razvijene toplove.

Kao što se može videti sa slike 2, brusna zrna režu najveću debljinu sloja materijala pri izlasku iz zahvatnog luka, stim što se ta debljina dodatno povećava sa povećanjem brzine obradka, jednačina (7). Veće debljine rezanja zahtevaju veću energiju deformisanja i trenja, što znači da se u tom delu zone rezanja proizvodi najviše toplotne energije pri brušenju, koja se preko dubine rezanja (a) provodi do nivoa obradene površine gde utiče na visinu kontaktne temperature.

U kom obimu će razvijena toplopa dospeti do obradene površine najviše zavisi od koeficijenta toplotne provodljivosti materijala obradka, ali i od dubine brušenja i brzine kretanja obradka. Ako materijal koji se brusi ima malu toplotnu provodljivost, a brzina obradka je velika, onda razvijena toplopa nema dovoljno vremena da se provede do površine obradka, već ostaje u zoni koju zahvataju sledeća brusna zrna i tako odlazi sa nastalom strugotinom. Ovome treba dodati i činjenicu da pri većim brzinama obradaka SHP brže dospeva na tek obrušenu površinu, pa se količina toplove koja iz zone rezanja provođenjem dospeva u površinski sloj obratka dalje umanjuje. Sve napred opisane pojave praktično rezultiraju manjim vrednostima kontaktne temperature.

Zavisno od materijala koji se brusi, postoje granice brzine pomoćnog kretanja do koje se ostvaruje prethodno opisano smanjenje kontaktne temperature. Korišćenjem

brzine pomoćnog kretanja u području ispod ove granice, što je neophodno kod dubokog i visokoučinskog brušenja, prethodno opisani efekti se gube, pa se povećanjem brzine pomoćnog kretanja u tom području povećavaju kontaktne temperature. Autori ovog rada su imali prilike da to i eksperimentalno potvrde pri visokoučinskom brušenju brzoreznog čelika Č 7680 (DIN S-6-5-2) brzinama pomoćnog kretanja koje su varirane od 0.3 do 1.3 m/min [7].

Odstupanje teoretskih i eksperimentalnih vrednosti kontaktne temperature Q_k javlja se i kod dubina rezanja (a), tabela I, tako što u nekim slučajevima dolazi i do smanjenja ove temperature. Ovo se dešava uglavnom pri brušenju sa velikim dubinama rezanja (duboko i visokoučinsko brušenje) i posledica je toga što se najviše mehaničke energije transformiše u toplotu na izlaznom delu kontaktne površine (o čemu je ranije bilo reči) i nemogućnosti da se ta toplota brzo provede preko dubine rezanja do obradene površine. Zbog toga najveći deo razvijene toplove ostaje u sloju materijala koji se brusi i odlazi sa strugotinom i SHP.

Osim dubine rezanja, na prethodno opisanu pojavu jako puno utiče toplotna provodljivost materijala obradka, tako da kod slabih provodnika toplove ova pojava je redovno prisutna, čak i kod manjih dubina brušenja (klasično brušenje).

Prethodno izneta analiza uticaja parametara režima brušenja na visinu kontaktne temperature neosporno potvrđuje ranije naglašeni značaj koji debljina nedeformisane strugotine ima na proces brušenja. Zbog toga je i razumljivo što se pri izboru parametara režima brušenja najčešće polazi od najpovoljnije vrednosti srednje debljine strugotine h_m za date uslove obrade, a zatim se u skladu sa jednačinom (9) uskladjuju: brzina tocila v_t , brzina obradka v_o i dubina brušenja a .

5. ZAKLJUČCI

Analiza uticaja režima obrade na visinu kontaktne temperature pri brušenju, koja je sprovedena u ovom radu, pokazuje svu složenost postupka obrade brušenjem u odnosu na druge postupke obrade. Pokazalo se, naime, da ako se proces rezanja posmatra čisto teorijski-idealizovan, onda se mogu pojaviti određene razlike u zaključcima koji proizilaze iz takvog razmatranja i stvarnog stanja koje se dobija na osnovu eksperimentalnih merenja. Međutim, to ne znači da su teorijska razmatranja netačna i nepotrebna, te da se sve pojave u procesu obrade brušenjem moraju pratiti isključivo eksperimentalnim putem. Naprotiv, mi mislimo da ova dva vida analize procesa brušenja zajedno daju najbolje rezultate. Teorijskim razmatranjem problema dolazi se do važnih zakonitosti, u ovom slučaju o jačini i vremenu delovanja toplotnog izvora, da bi se iste pravilno korigovale na

osnovu rezultata eksperimentalnih merenja i tako premostile one pojave koje se teorijski ne mogu obuhvatiti.

Neslaganje između teorijski izvedenih zaključaka i rezultata praktičnih merenja pri obradi brušenjem su po našem mišljenju posledica neuzimanja u obzir sledećih specifičnosti kojima se odlikuje proces brušenja:

- Potpuno nedefinisani geometrijski oblici brusnih zrna, odnosno njihovih sečiva;
- Neravnomerni raspored brusnih zrna u točilu, a time i relativno prema obradku;
- Veoma nepovoljna rezna geometrija brusnih zrna koja se ogleda u negativnom grudnom uglu (najčešće između -60° i -88°) i malom leđnom uglu (često je 0°);
- Fizikalna svojstva sistema: obradak - brusna zrna - strigotina - vezivno sredstvo - SPH sredstvo.

Ovo poslednje je naročito značajno, stim što odlučujući uticaj na pomenuta neslaganja ima topotna provodljivost materijala obradka, ali i brusnih zrna sa vezivnim sredstvom. Zbog toga se ova karakteristika materijala često uzima kao najvažniji faktor koji određuje obradljivost datog materijala brušenjem. U tom smislu pokazalo se da određene vrste materijala uopšte nisu podesne za produktivno visokoučinsko brušenje, jer se praktično ne može sprečiti njegovo pregrevanje pri obradi i sve posledice koje iz toga proizilaze.

Osim utvrđivanja tačnog uticaja režima obrade na visinu kontaktne temperature, autori su želeli da ovim radom otklone mnoge nepreciznosti, pa i netačnosti, koje su u vezi definisanja parametara procesa brušenja do sada bile prisutne u literaturi.

LITERATURA

- [1] JOVIČIĆ M., KRŠLJAK B., VUKASOJEVIĆ R., DROBNJAK V.: *Obrada brušenjem - Identifikacija stanja i optimizacija procesa*, Mašinski fakultet i Jupiter zajednica, Beograd, 1986.
- [2] CEBALO R.: *Duboko brušenje*, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [3] KÖNIG W.: *Fertigungsverfahren*, Band 2 - Schleifen, Honen, Läppen. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1980.
- [4] N. N.: *Leitfaden der Schleiftechnik*, Schaudt Maschinenbau GmbH, Stuttgart, 1988.
- [5] MILIKIĆ D., GOSTIMIROVIĆ M.: *Temperaturrezanja pri obradi brušenjem*, Zbornik radova IPM 11 (1994), br. 11, FTN, Novi Sad, 1994.
- [6] MILIKIĆ D., Prilog analizi temperatura u temperaturskom polju pri obradi brušenjem., Naučno-stručni skup MMA '76., Novi Sad 14-17. oktobar 1976.
- [7] MILIKIĆ D., DROBNJAK V., KOVAČ P., GOSTIMIROVIĆ M.: *Heat Aspekte of Twist Drills Produktion by High Efficiency Grinding Process*, XIth International Conference on Production Research (ICPR), August 18-23, 1991, Hefei, China.
- [8] BOGNER N., HELLETSBERGER H., KRIEG-SHABER CH., NOLCHL H.: *Schleifen mit kubischen Bornitrid und konventionellen Schleifmitteln*, Intergrind '88 Conference, Budapest, 15-17., November 1988.
- [9] ÖZHAN F.: *Zerspantemperaturen beim Schleifen von weichmagnetischen Werkstoffen*. Industrie-Anzeiger 108(1986) Nr. 5.
- [10] KÖNIG W., DEDERICHS M.: *Temperaturmessungen und arbeitsergebnisse beim Flachschleifen*, Industrie-Anzeiger 96(1974) Nr. 38.
- [11] WERNER G., DEDERICHS M.: *Spanbildungsprcess und Temperaturbeeinflussung des Werkstückes beim Schleifen*, Industrie-Anzeiger 94(1972), Nr. 98.
- [12] MILIKIĆ D., KOVAČ P., RVOVIĆ M.: *Prilog određivanju kontaktnih temperatura pri ravnom brušenju*, XIX Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kragujevac, 1985.

1) *U ovom radu su korišćene merne jedinice koje su prime-rene veličini pojedinih parametara i koje se najčešće koriste u naučnoj i stručnoj literaturi.*

2) *Kod jednačina koje su izvedene ili kao gotove korišćene u ovom radu nisu uzimane u obzir merne jedinice u kojima se izražavaju pojedini parametri.*

Influence of Tribological and Geometrical Parameters of The Grinding Process on The Magnitude of The Cutting Temperature

In the paper is analyzed the influence of kinematic and geometrical parameters of the process on the magnitude of the cutting temperature in grinding based on theoretical considerations and results of experimental measurements. Under the assumption that the grinding granule take off the ideal volume of the non deformed shaving, the expression was obtained for the specific strength of the heat source and the time of its action. Based on these two parameters the quantitative conclusions were drawn about the influence of kinematic and geometrical parameters of the grinding process on the magnitude of the contact temperature, i.e., the temperature in the surface layer of the machined piece. Taking into account results of the experimental investigations, obtained by the authors themselves, as well as by other researchers, the qualitative analysis is given which explains the shown differences.

The cutting by the grinding granule is accompanied by high friction on the contact surfaces, as well as the interior friction in the working piece material bulk, thus the grinding process can be considered, to the great extent, as the tribological process with all the consequences that come from this.

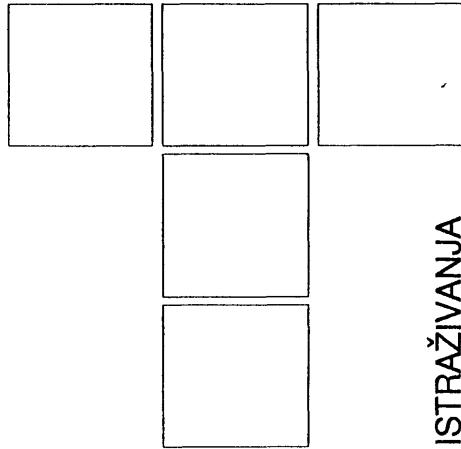
Воздействие кинематических и геометрических параметров процесса шлифования на температуры резания

Авторами работы анализируется влияние кинематических и геометрических параметров процесса на высоту термоградиур резания при шлифовании, на основе теоретического рассмотрения и результатов экспериментальных измерений. При предположении, что шлифованное зерно снимает идеальный объем недеформированной стружки, авторы получили выражение для удельной силы источника тепла и его воздействия. На основании этих параметров сделаны количественные выводы о влиянии данных параметров шлифовки на интенсивность контактных термоградиур, т.е. термоградиур в поверхностном слое заготовки. Исходя из результатов собственных исследований, и других результатов, полученных другими исследователями, авторы дают качественный анализ, объясняющий возникшие разницы.

Резание шлифованного зерна сопровождается интенсивным трением на контактных поверхностях, как и внутренним трением в материале заготовки, в результате чего процесс шлифования можно наблюдать в значительной мере и как трибологический процесс со всеми его последствиями.

J. VLADIĆ, B. SOVILJ

Tribološke karakteristike prenosa snage putem trenja kod specifičnih transportnih mašina



ISTRAŽIVANJA

1. UVOD

Konstruisanje mašina i mehanizama u smislu njihovog oblikovanja ima značajan uticaj na trenje i habanje tribomehaničkih sistema. Uticaj oblikovanja i geometrije na tribološke procese u sistemima je saznanje čije uzročno-posledične veze nisu ni do danas čak ni skromno istražene.

Savremena saznanja nauke o konstruisanju još uvek u proces konstruisanja ne uključuju dovoljno i tribološke aspekte konstruisanja. Principi savremenog konstruisanja zahtevaju pouzdan prenos sile i opterećenja preko kontaktnih površina u relativnom kretanju. Tribološki ispravno konstruisanje uslovjava da izvedena konstrukcija pored pouzdanog rada bude bezbedna i u pogledu habanja, čak i u eksperimentalnim uslovima eksploatacije [6].

Sistemski prikaz kompleksnosti trenja preko uslova pod kojima se ovaj proces odvija i njegova povezanost sa razaranjem i krajnjim posledicama dat je na slici 1. [4, 5].

Tribološki procesi se odvijaju pri neprekidnom razaranju delova površine kontakta i nastojanju novih, fizičkih i topografski sličnih ili kompletno različitih površina od predhodnih. Razaranje i nastajanje delova površine kon-

takta se odigrava vremenski neujednačeno i prostorno diskretno.

Karakteristike elemenata tribomehaničkog sistema, a pre svih specifičnost topografije kontaktnih površina utiče na deformaciono stanje u zoni kontakta.

Promena stanja tribomehaničkog sistema nastaje zbog razvoja triboloških procesa, a ogleda se i kroz promenu topografije kontaktnih površina.

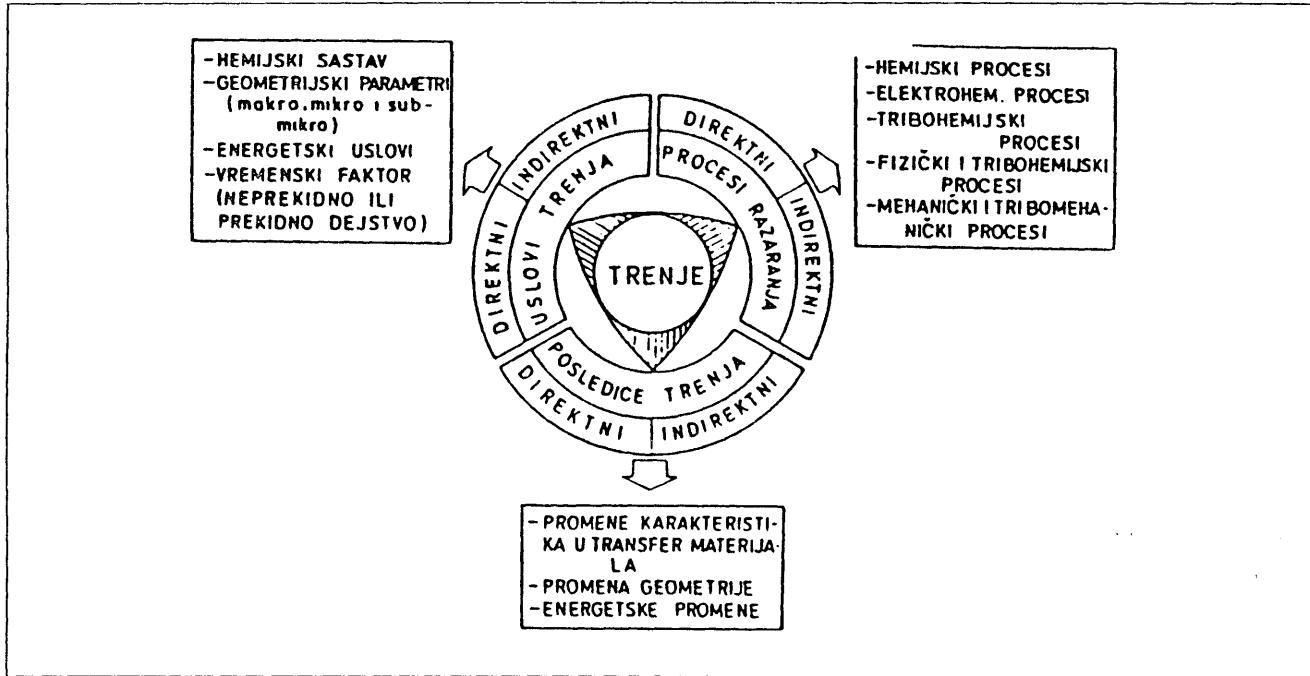
Veza izmedju topografije kontaktnih površina i razvoja triboloških procesa je složena. Promena topografije pri razvoju triboloških procesa može da se prikaže modelom kao na slici 2. [5].

Tribološki aspekti i tribologija u konstruisanju je neminovnost ispravnog projektovanja specifičnih transportnih mašina kod kojih se primenjuje prenos snage putem trenja korišćenjem pogonske užnice.

U sistemima prenosa snage kada se spoljnje opterećenje nalazi na velikom rastojanju od izvora pogonske sile prioritetno rešenje predstavlja prenos opterećenja putem savitljivih elemenata (čelično uže, lanac, transportna traka, ...). Čelično uže se, zbog odredjenih prednosti, veoma često primenjuje u sklopu pogona dizanja ili kretanja specifičnih dizaličko-transportnih mašina. U tim slučajevima se koristi ili pogonski bubanj ili pogonska užnica.

Pogonska užnica se primenjuje na onim mestima gde se zahtevaju velika pomeranja (liftovi, žičare,...) jer se njenom primenom eliminiše problem magacioniranja užeta.

*Doc. dr. Jovan Vladić, dipl. ing.,
Prof. dr Bogdan Sovilj, dipl. ing.,
FTN - Institut za proizvodno mašinstvo, Novi Sad*



Slika 1. Sistematska analiza pojava pri trenju
Systematic analysis of the friction phenomena
Систематический анализ явлений, возникающих при трении

Pri tome se kao osnovna karakteristika pogona javlja prenos opterećenja putem trenja između čeličnog užeta i pogonske užnice. Kako se, zbog sigurnosti rada i veka trajanja elemenata, ne sme dozvoliti klizanje užeta po pogonskoj užnici, neophodno je još u toku projektovanja imati definisane uslove koji obezbeđuju sigurnost prenosa ovakvim elementima koji su u praksi obuhvaćeni pojmom stepena sigurnosti protiv proklizavanja.

2. DEFINISANJE PROBLEMA I CILJ RADA

U zavisnosti od načina definisanja stepena sigurnosti protiv proklizavanja, koji u osnovi predstavlja rezervu vučne sposobnosti užnice u odnosu na merodavnu veličinu pri radnim uslovima, u literaturi se najčešće koriste sledeći izrazi:

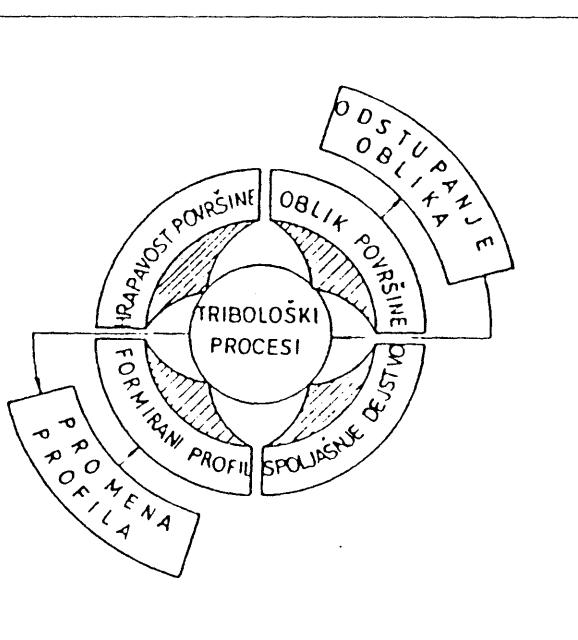
$$\varphi_1 = \frac{U_{\max}}{U} = \frac{s_2 \cdot (e^{\mu\alpha} - 1)}{s_1 - s_2} \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \frac{S_{1\max}}{S} = \frac{s_2 \cdot e^{\mu\alpha}}{s_1} \quad (2)$$

$$\varphi_3 = \frac{s_1 + s_2}{s_1 - s_2} \cdot \operatorname{th}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (3)$$

pri čemu su date njihove minimalne vrednosti. Uporedjenjem graničnih vrednosti stepena sigurnosti, saglasno njihovoj definiciji, mogu se konstatovati značajne razlike u veličinama zona sigurnosti koje obezbeđuju uže od klizanja po pogonskoj užnici.

Analizirajući izraze za stepene sigurnosti protiv proklizavanja uočljive su mogućnosti povećanja vučne sposobnosti pogonske užnice odnosno sigurnosti prenosa opterećenja na ovaj način. Povećanje vučne sposobnosti užnice se može ostvariti povećanjem sile "zatezanja" (S_2), koeficijenta trenja (μ) i obuhvatnog ugla (α). Svaka od ovih mogućnosti predstavlja skup kompleksnih kombinacija uticajnih faktora i u okviru ovog rada će se detaljnije razmatrati samo uticaj redukovanih koeficijent trenja, koji u osnovi predstavlja povećanje kontaktnog pritiska izborom



Slika 2. Promena topografije pri razvoju triboloških procesa
Change of topography in development of tribological processes
Изменение топографии при развитии трибологических процессов

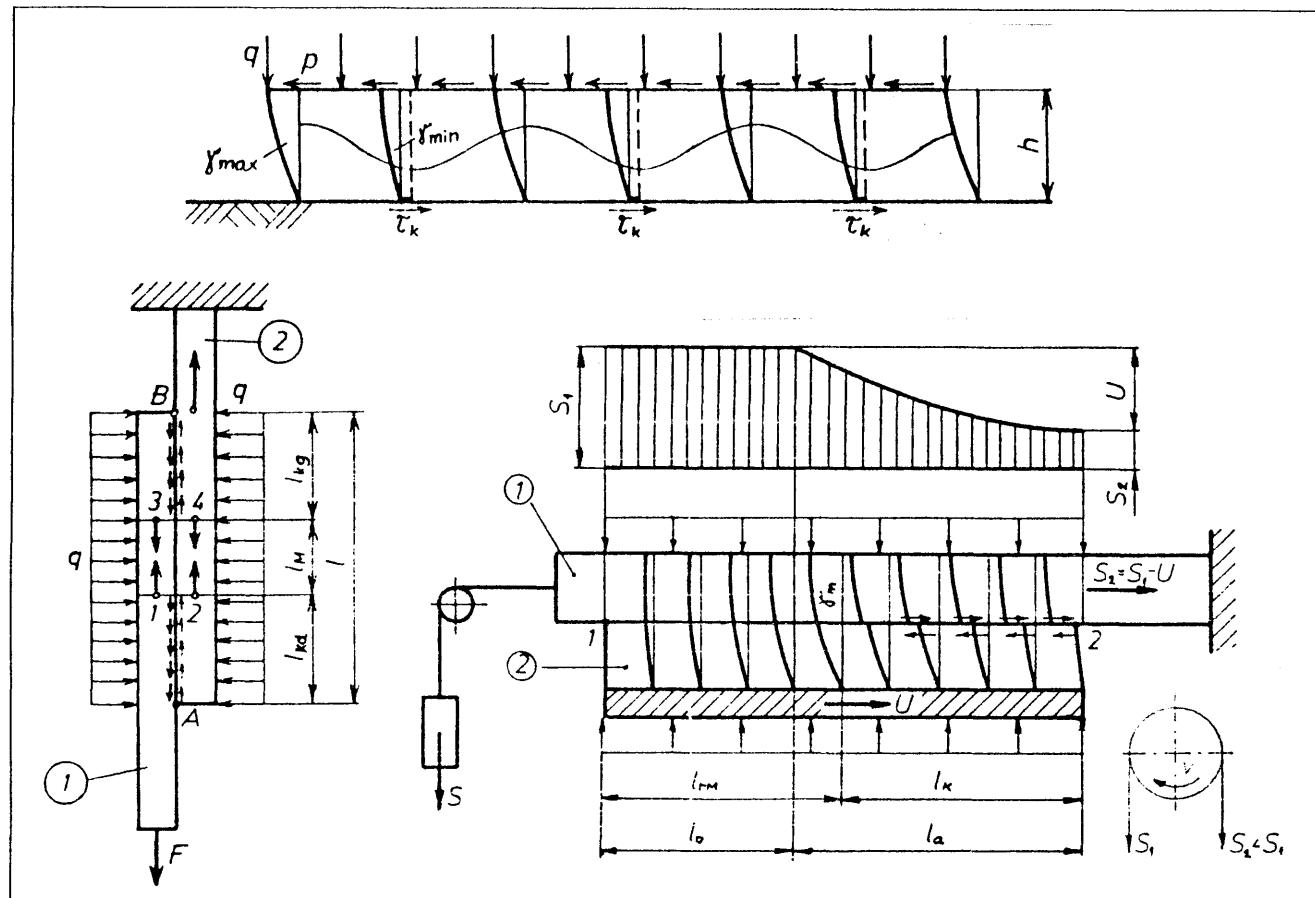
određenog oblika žljeba (sl. 5a), i uticaj habanja žljeba užnice na njegovu veličinu. Da bi se potvrdila adekvatnost teorijskih razmatranja, posebno o samoj problematiki mehanizma prenosa snage putem trenja, izvršeno je eksperimentalno ispitivanje koeficijenta trenja sa različitim prečnicima i konstrukcijama užadi, oblicima žljebova i tvrdoće kontaktne površine pogonske užnice.

3. MEHANIZAM PRENOSA OPTEREĆENJA POGONSKOM UŽNICOM

Teorija prenosa opterećenja pogonskom užnicom bazira na teoriji razvijenoj za remene prenosnike i trakaste transportere. Adekvatno objašnjenje samog mehanizma prenosa opterećenja moguće je uzimanjem u obzir deformacija kontaktnih površina.

Na osnovu deplanacione teorije [1] prenos opterećenja pogonskom užnicom se odvija uz kombinaciju dva granična slučaja tkz. elastično klizanje prve i druge vrste sa sledećim karakteristikama:

3.1. Elastično klizanje prve vrste (sl. 3a.) se javlja kod elastičnih elemenata veće debljine opterećenih sa $p = \text{const}$ i $g = \text{const.}$, pri čemu se zbog ekscentričnog opterećenja javlja deplanacija (zakriviljivanje) preseka elastičnog elementa a prenos opterećenja se odvija uz pojavu,



Sl.3. Karakteristike prenosa putem trenja izmedju elastičnih elemenata
Characteristics of the transmission by friction between elastic elements
Характеристики передачи трением при контакте упругих элементов

u funkciji hrapavosti, rasporedjenih zona klizanja i mirovanja (relativno mirovanje). Pri povećanju tangencijalnog opterećenja (p) odjednom dolazi do klizanja elemenata kao celine što ima za posledicu znatnu razliku u veličini koeficijenta trenja kretanja i mirovanja. Ovaj vid prenosa opterećenja je veoma bitan sa stanovišta određivanja graničnih vrednosti sigurnosti protiv proklizavanja jer određuje veličinu zone relativnog mirovanja (α_{rM})

3.2. Elastično klizanje druge vrste (sl. 3b) javilo bi se pri prenosu opterećenja elastičnim elementima veoma male debljine pri čemu se kao jedino moguća deformacija javlja istezanje elemenata (deplanacija se može zanemariti zbog veoma male ekscentričnosti opterećenja) što je uzrok pojavi zone sa elastičnim klizanjem, gde se realizuje ukupan prenos opterećenja, i zone absolutnog mirovanja. Prelaz povećanjem sile (F) u klizanje elemenata kao celine se vrši postepeno bez značajnije razlike u vrednosti koeficijenta trenja mirovanja i kretanja.

3.3. Mehanizam prenosa opterećenja kod pogonske užnice odvija se uz kombinaciju prethodna dva idealizovana načina koji predstavljaju granične slučajevе. Obzirom na oblik opterećenja kod pogonske užnice interesantan je, za dalje razmatranje, model elastičnog

klizanja druge vrste pri čemu su elastični elementi konačne debljine. U ovom slučaju se deplanacija ne može zanemariti i pored zone klizanja (l_k) i apsolutnog mirovanja (l_m) javlja se i zona relativnog mirovanja (l_m). Pri tome se dužina zone klizanja određuje na osnovu izraza:

$$l = \frac{k \cdot F}{\mu \cdot q \cdot (1 + \frac{E_1 \cdot A_1}{E_2 \cdot A_2})} \quad (4)$$

gde je: $E_1 \cdot A_1$ - krutost elastičnog elementa (1)

$E_2 \cdot A_2$ - krutost elastičnog elementa (2)

$k < 1$ - koeficijent uticaja geometrijskih karakteristika elastičnih elemenata

Primenjujući prethodno izloženu teoriju moguće je na osnovu linijskog modela, prikazanog na sl.3c. objasniti mehanizam prenosa opterećenja kod pogonske užnice.

Sl. 3c. predstavlja model užnice kod koje je sila u nailaznom kraku (S_1) veća od sile u silaznom kraku (S_2), čija razlika predstavlja veličinu obimne sile, $U = S_1 - S_2$. Ako se elastični element (1) (čelično uže) po celoj dužini optereti silom (S_1) doći će do njegovog izduženja saglasno Hukovom zakonu. Ako se zatim ostvari kontakt sa elastičnim elementom 2) (pogonska užnica) na koji se nanese tangencijalno opterećenje jednako obimnoj sili, pod uslovom da ne dodje do klizanja elementa (2) kao celine, u tački (2) elastičnog elementa (1) će se na osnovu uslova ravnoteže, javiti sila $S_2 = S_1 - U$. Ovoj sili po Hukovom zakonu, odgovara manja deformacija što izaziva oblik klizanja koji odgovara klizanju druge vrste. Pošto se radi o elastičnim elementima konačne debljine istovremeno sa elastičnim klizanjem druge vrste se javlja deplanacija (zakriviljivanje) preseka sa povećanjem ukupne deformacije počev od tačke (2) ka unutrašnjosti kontakta. Na mestima gde bi razlike sila u elastičnim elementima izazvale veće deformacije od graničnih javilo bi se klizanje kontaktnih površina tzv. elastično klizanje (l_k). Ukupna sila trenja se praktično realizuje (prenosi) na ovoj dužini kontakta odnosno na nešto većoj dužini (l_a) gde se javlja maksimalna deplanacija bez klizanja oba elastična elementa (sl. 3c).

Prema ovakvom mehanizmu prenosa opterećenja moguće je objasniti i formiranje odgovarajućih uglova klizanja i relativnog mirovanja na pogonskoj užnici za slučaj veće (sl. 4a.) i manje (sl. 4b.) sile u nailaznom kraku uzeta od opterećenja silaznog kraka uzeta. Drugim rečima ugao elastičnog klizanja se javlja uvek na silaznoj strani bez obzira na odnos veličina sila u nailaznom i silaznom kraku uzeta.

4. VUČNA SPOSOBNOST UŽNICE

Vučna sposobnost pogonske užnice definisana je odnosom maksimalno moguće sile u nailaznom i sile u silaznom kraku uzeta:

$$C = \frac{S_{1max}}{S_2} = e^{\mu \alpha} \quad (5)$$

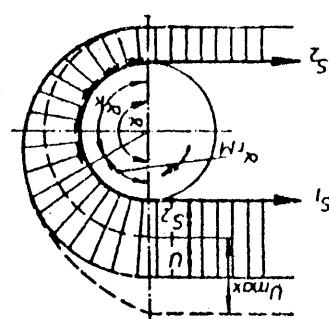
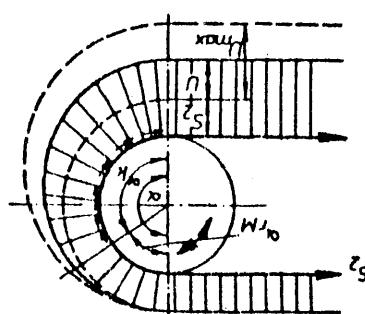
Maksimalno moguća obimna sila izražena preko vučne sposobnosti je:

$$U_{max} = S_2 \cdot (C - 1) \quad (6)$$

Na osnovu izraza (5) vidi se da povećanje vučne sposobnosti pogonske užnice može da se izvrši povećanjem koeficijenta trenja i obuhvatnog ugla i indirektno povećanjem kontaktnog pritiska izmedju užeta i užnice (specijalnim hvatačima, pomoćnim užetom...). Zbog rasprostranjenosti primene na pogonskim užnicama pri vertikalnom dizanju ovde će nešto više prostora biti posvećeno uticaju oblika žljeba na vučnu sposobnost. Najčešći oblici naleganja užeta na užnicu (oblik žljeba) koji se danas primenjuju prikazani su na sl.5a.

Mogućnost prenosa pogonskom užnicom u zavisnosti od oblika žljeba nejčešće se opisuje preko tkz. redukovanih koeficijenata trenja. Redukovani koeficijent trenja predstavlja fiktivnu (zamišljenu) vrednost koja bi trebala da se javi na "ravnom" žljebu uz ostvarivanje iste obimne sile zadržavanjem ostalih parametara na istom nivou.

Na osnovu ove definicije izvodi se funkcionalna zavisnost veličine redukovanih koeficijenata trenja od parametara oblika žljeba i osnovnog koeficijenta trenja (μ_0). Ovde će



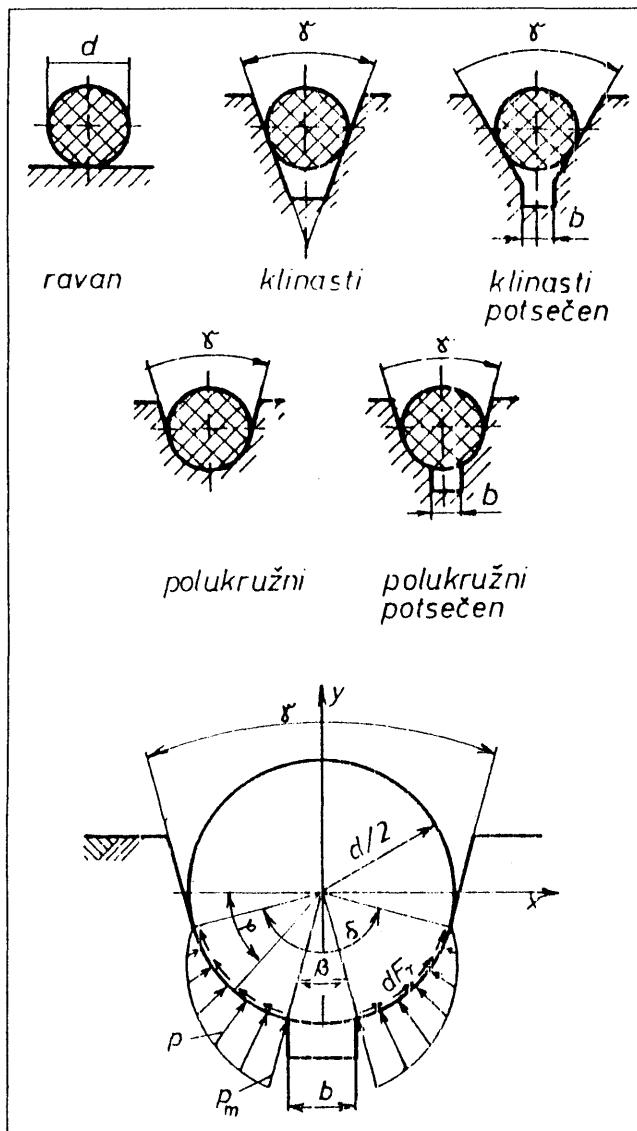
Sl.4. Rasporед sile i karakterističnih zona na pogonskoj užnici
Distribution of forces and characteristic zones on the driving pulley
Распределение сил и характерных зон на приводном коническом шкиве

biti ukratko prikazan postupak određivanja redukovanih koeficijenta trenja koji, na osnovu računskog modela za najsloženiju formu naleganja (polukružno-potsečen žljeb) (sl. 5b) omogućuje određivanje funkcionalne zavisnosti za sve ostale oblike. Uobičajena je pretpostavka o raspodeli kontaktnog pritiska između užeta i pogonske užnice u obliku sinusne funkcije:

$$p = p_m \cdot \sin\varphi \quad (7)$$

gde je: p_m - maksimalna vrednost pritiska

Ovakva pretpostavka je opravdana samo za približno opisivanje stvarnih stanja koja pokazuje relativno dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima za ravan, polukružni i polukružno-podsečen žljeb sa malim uglom podsecanja. Za polukružno-podsečen žljeb sa većim uglovima podsecanja i klinasti žljeb njena primena dovođi do znatnih odstupanja obzirom da velik uticaj ima oblik deformisanja užeta u poprečnom preseku.



Sl. 5. Oblici žljbova (a) i opšti računski model (b)
Shapes of grooves (a) and general computation model (b)
Формы канавок (а) и общие расчетные модели (б)

Posmatrajući ravnotežu sila u radikalnom preseku polukružno-potsečenog žljeba kao oblika koji sadrži sve karakteristike ostalih oblika naleganja može se napisati:

$$N = 2 \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} dP \cdot \sin\varphi + dF_t \cdot \cos\varphi \quad (8)$$

gde je: $dp = p \cdot dA = p_m \cdot R \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi$

$$dF_t = \mu_o \cdot dP = \mu_o \cdot p_m \cdot R \cdot \sin\varphi \cdot d\varphi$$

$$\varphi_1 = \frac{\pi\delta}{2}, \varphi_2 = \frac{\pi\beta}{2}$$

Ako se izvode određene transformacije i zamene dobija se opšti izraz za redukovani koeficijent trenja u obliku:

$$\mu = 4 \cdot \mu_o \cdot \frac{\sin \frac{\delta}{2} - \sin \frac{\beta}{2}}{\delta - \beta + \sin \delta - \sin \beta + \mu_o (\cos \beta - \cos \delta)} \quad (9)$$

Uvrštavajući parametre za posebne oblike naleganja moguće je odrediti granične vrednosti redukovanih koeficijenata trenja i to za slučaj zanemarivanja i uzimanja u obzir veličine bočnog trenja, što je prikazano u tabeli 1.

Pošto se klinasti oblik žljeba veoma često koristi potrebno je analizirati uticaj habanja na veličinu vučne sposobnosti užnice odnosno redukovanih koeficijenata trenja. Na sl. 6. su prikazana dva karakteristična slučaja koja se javljaju pri habanju kontaktne površine užnice sa ovakvim oblikom naleganja.

Na osnovu sl. 6a. i b. može se napisati

$$\delta = \begin{cases} \pi - \gamma + 2 \cdot \text{arc cos} \left(1 - \frac{2 \cdot k}{d} \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \right) & \text{za } k < m \\ \pi & \text{za } k \geq m \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta = \begin{cases} \pi - \gamma + 2 \cdot \text{arc cos} \left(1 - \frac{2 \cdot k}{d} \cdot \sin \frac{\gamma}{2} \right) & \text{za klinasti žljeb} \\ 2 \cdot \text{arcsin} \frac{b}{d} & \text{za klinasti podsečen} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{gde je: } m = \frac{d}{2 \cdot \sin \frac{\gamma}{2}} \cdot (1 - \cos \frac{\gamma}{2})$$

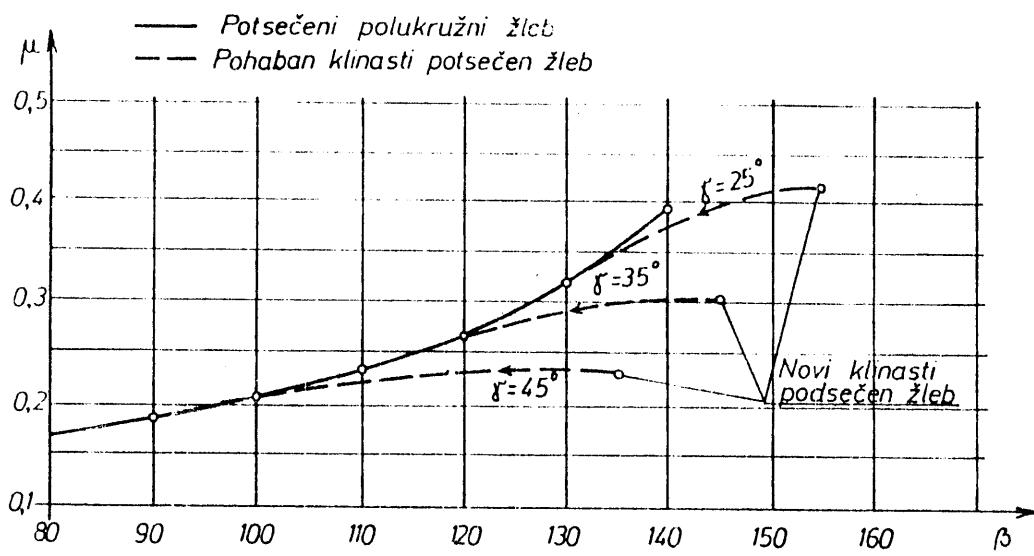
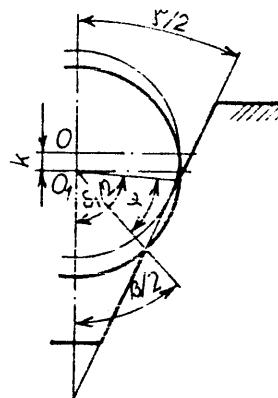
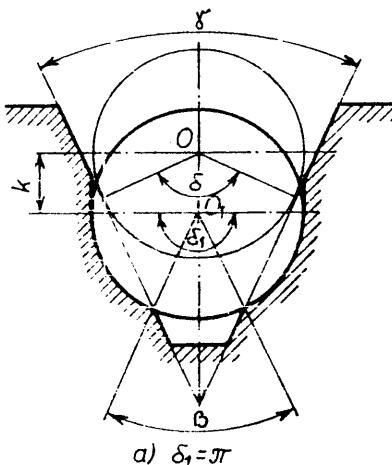
Uvrštavajući ove izraze u izraz (9) moguće je određivanje veličine redukovanih koeficijenata trenja u funkciji vertikalnog pomeranja centra preseka užeta kao mere habanja užnice što je prikazano na dijagramu sl. 6c. Na osnovu prethodnog, vučna sposobnost užnice se smanjuje u toku eksploatacije i teži vrednosti za polukružni žljeb, zato se u praksi često vrši tzv. "podsecanje" klinastog žljeba (sl. 5a-3) za koji je vrednost koeficijenta trenja, (sl. 6a.):

$$\mu = 4 \cdot \mu_o \cdot \frac{1 - \frac{b}{d}}{\pi - \text{betta} - \sin \beta + \mu_o \cdot (1 + \cos \beta)} \quad (12)$$

gde je b veličina "podsecanja" klinastog žljeba.

Tabela 1:

Oblik žljeba	Reducovani koeficijent trenja	
	bez bočnog trenja	sa bočnim trenjem
1. "ravan"	$\mu = \mu_o$	$\mu = \mu_o$
2. "klinasti"	$\mu = \frac{\mu_o}{\sin(\frac{\gamma}{2})}$	$\mu = \frac{\mu_o}{\sin(\frac{\gamma}{2}) + \mu_o \cdot \cos(\frac{\gamma}{2})}$
3. "podsečen"		
4. "polukružni" $d \neq p$	$\mu = 4 \cdot \mu_o \cdot \frac{\sin \frac{\delta}{2}}{\delta - \sin \delta}$	$\mu = 4 \cdot \mu_o \cdot \frac{\sin \frac{\delta}{2}}{\delta - \sin \delta + \mu_o \cdot (1 - \cos \delta)}$
5. "polukružni podsečen" $\delta = \pi$	$\mu = \frac{4 \cdot \mu_o}{\pi}$	$\mu = \frac{4 \cdot \mu_o}{\pi + 2 \cdot \mu_o}$
6. "polukružni podsečen" $\delta \neq \pi$	$\mu = 4 \cdot \mu_o \cdot \frac{\sin \frac{\delta}{2} - \sin \frac{\beta}{2}}{\delta - \beta + \sin \delta - \sin \beta}$	izraz (9)
7. "polukružni podsečen" $\delta = \pi$	$\mu = 4 \cdot \mu_o \cdot \frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\pi - \beta - \sin \beta}$	$\mu = 4 \cdot \mu_o \cdot \frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\pi - \beta - \sin \beta + \mu_o \cdot (1 + \cos \beta)}$



Sl. 6. Karakteristike i promena redukovanih koefficijenta trenja pri habanju užnice sa klinastim žljebam
Characteristics and change of the reduced friction coefficient in wear of the pulley with the wedge like groove
Характеристики и изменение оценки трения при изнашивании канавки с клиновидной канавкой

5. EKSPERIMENTALNO ODREDJIVANJE KOEFICIJENTA TRENA I ELASTIČNOG KLIZANJA

Da bi se proverila adekvatnost primene matematičkog modela o uticaju oblika naleganja na vučnu sposobnost užnice kao i pretpostavke o mehanizmu prenosa planirano je eksperimentalno ispitivanje. Planirane su dve serije eksperimentata pri čemu je prva serija obuhvatila određivanje koeficijenta trenja za sledeće uslove:

1. Užad

- a) $\phi 10 - 6 \times 37 + 1v.u. - S/Z$ pocinkovano
- b) $\phi 12 - 6 \times 37 + 1v.u. - S/Z$ "golo"

2. Užnica $\phi 400$ od Č.0360

3. Oblici i parametri oblika naleganja (žljebovi)

- "ravan"
- polukružni o o
- polukružni-potsečen sa $\beta_1 = 75^\circ$ i $\beta_2 = 90^\circ$
- klinasti sa $\gamma_1 = 30^\circ$, $\gamma_2 = 35^\circ$, $\gamma_3 = 45^\circ$

Druga serija eksperimentata obuhvatala je pored određivanja veličine redukovanih koeficijenta trenja za klinasti žljeb i utvrđivanje elastičnog klizanja i uticaja tvrdoće kontaktne površine. Uslovi u drugoj seriji su bili sledeći:

1. Užad

- a) $\phi 8 - 6 \times 37 + 1v.u. - S/Z$ - golo
- b) $\phi 8 - 6 \times 37 + 1v.u. - S/Z$ - pocinkovano
- c) $\phi 10 - 6 \times 37 + 1v.u. - S/Z$ - "golo"

Tabela 2. Rezultati merenja: 2. serija

Karakteristika užeta	Opt.	HRC 40					HRC 60		
		Ravan	Klinasti			Ravan	Klinasti		
			$\gamma = 45^\circ$	$\gamma = 35^\circ$	$\gamma = 25^\circ$		$\gamma = 45^\circ$	$\gamma = 35^\circ$	$\gamma = 25^\circ$
$\phi 8$ "golo" odmaščen	S_1	0.284	0.544	0.690	0.773	0.158	0.408	0.731	1.099
	S_2	0.194	0.524	0.652	0.757	0.117	0.473	0.606	0.968
	S_3	0.237	0.570	0.635	0.674	0.087	0.483	0.604	0.879
	μ_{sr}	0.238	0.546	0.659	0.735	0.134*	0.424	0.646	0.982
$\phi 8$ pocink. odmaščen	S_1	0.295	0.606	0.968	0.996	0.159	0.777	0.862	-
	S_2	0.277	0.646	0.934	0.962	0.096	0.681	-	-
	S_3	0.261	0.831	0.951	1.109	0.085	0.701	0.655	-
	μ_{sr}	0.278	0.694	0.951	1.022	0.113*	0.720	0.740	- **
$\phi 10$ "golo" odmaščen	S_1	0.275	0.509	0.751	0.910	0.228	0.474	0.736	1.019
	S_2	0.203	0.472	0.675	0.764	0.184	0.447	0.644	1.015
	S_3	0.232	0.493	0.676	0.739	0.177	0.462	0.616	0.893
	μ_{sr}	0.237	0.491	0.701	0.804	0.196	0.461	0.665	0.976

* Užnica i uže nisu bili dovoljno odmaščeni

** Rezultati nisu dobijeni jer je došlo do uklinjavanja užeta

2. Izrađene su dve geometrijski iste užnice prečnika $\varnothing 270$ mm od Č. 4230 termički obradnjene i to jedna na 40 HRC i a druga na 60 HRC.

3. Parametri klinastog žljeba su: $\gamma_1 = 25^\circ$, $\gamma_2 = 35^\circ$, $\gamma_3 = 45^\circ$

5.1. Opis i konstrukcija uredjaja za eksperimentalno ispitivanje

Konstrukcija uredjaja je bazirana na matematičkom izrazu:

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{S_1}{S_2} \quad (13)$$

odnosno:

$$\mu = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(\frac{2 \cdot M}{S_2 \cdot D} + 1 \right) \quad (14)$$

gde je: M - pogonski momenat, očitava se na meraču momenta

S_1 - sila u nailaznom kraku užeta merena

pomoću dinamometra

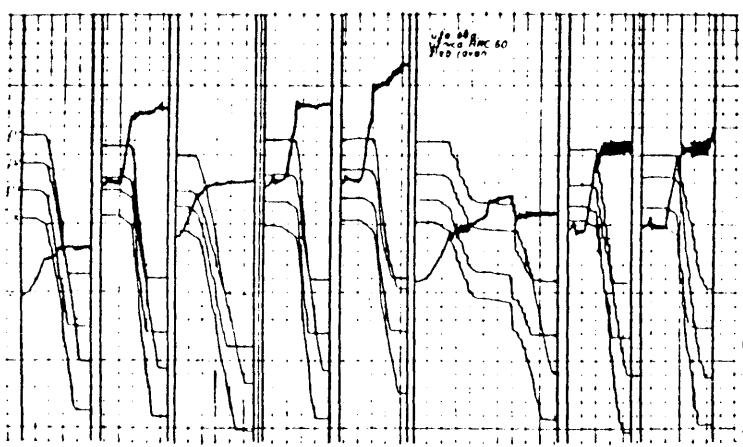
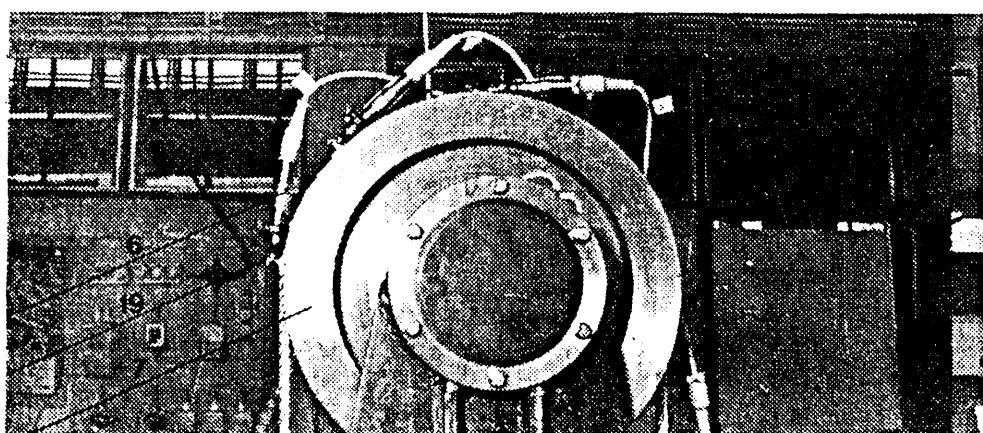
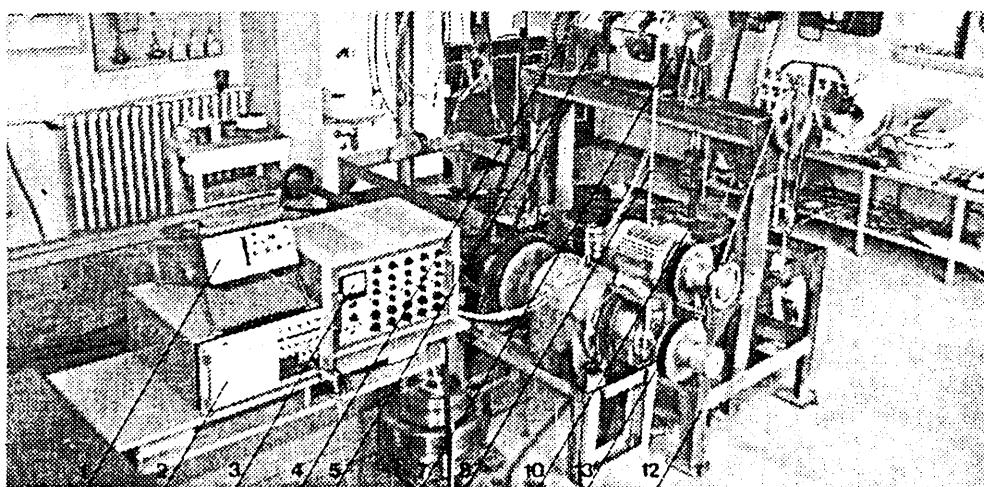
S_2 - sila u silaznom kraku određena težinom tegova

D - prečnik užnice

Na sl. 7. predstavljen je uredjaj za eksperimentalno ispitivanje. Sila (S_1) je merena pomoću dinamometra. Čelično uže je jednim krajem preko gornjeg i donjeg držača vezano za noseću konstrukciju dok je na drugom kraju vezano postolje na koje se može postaviti određeni broj tegova simulirajući silu (S_2). Pogon užnice, odnosno simulacija pogonskog momenta, je ostvarivana pomoću varijatora, lančanog prenosnika i merača momenta T30 FN proizvodnje Hottinger Baldwin Messtechnik. Merna aparatura se sastojala od osciloskopa Tektronix 434 pisača 18588 Visicorder proizvodnje Honeywell i

pojačala KWS/ST-5 Hottinger Baldwin Messtechnik. Merenje elastičnog klizanja je vršeno pomoću davača pomeranja čiji su se merni pipci naslanjali na graničnike

zalepljene za čelično uže. Davači pomeranja su se preko magnetskih stalaka učvršćivali za užnicu. Pored registrovanja elastičnog klizanja na ovaj način se mogao veoma



Sl. 7. Uredaj za eksperimentalno ispitivanje redukovanih koefficijenata trenja i elastičnog klizanja
Setup for experimental investigation of the reduced friction coefficient and elastic sliding
Устройство для экспериментального исследования огнносийельного коэффициента трения и упругого скольжения

tačno odrediti trenutak proklizavanja užeta kao celine (početak klizanja davača).

Primenjujući standardni postupak jednofaktornog randomiziranog eksperimenta u prvoj seriji je izvršeno 210 a u drugoj 216 eksperimentalnih jedinica. Nakon izvedenog merenja je izvršena statistička obrada dobijenih rezultata. Na sl. 7. dat je prikaz nekih merenja. U tabeli 2 dati su neki od rezultata II serije merenja i izračunate veličine redukovanih koeficijenta trenja.

Poredjenjem računskih i eksperimentalnih rezultata može je konstatovati značajnije razlike kod oblika naleganja gde se ostvaruju veći kontaktni pritisci. Rezultati eksperimenta sa užnicama različite tvrdoće ukazuju na značajan uticaj tzv. "uklinjavanja" užeta kao posledice "usecanja" žica u površinu užnice što nije bilo obuhvaćeno matematičkim modelom. Rezultati merenja se odnose na opterećenja znatno uža od eksploracionih i imaju samo ilustrativan karakter.

6. ZAKLJUČAK

U radu je ukazano na značaj triboloških procesa pri projektovanju specifičnih transportnih mašina sa posebnim osvrtom na problematiku prenosa snage putem trenja i uticaj habanja kontaktnih površina na vučnu sposobnost pogonske užnice. Prikazan je postupak za određivanje realnih vrednosti redukovanih koeficijenta trenja za različite oblike naleganja čeličnog užeta na pogonskoj užnici. Planiranjem sveobuhvatnijih eksperimentalnih ispitivanja,

posebno u oblasti eksploracionih opterećenja, omogućilo bi se određivanje adekvatnosti matematičkih modela za izračunavanje redukovanih koeficijenta trenja.

Posebna problematika, koja je tek napomenuta u uvodnom delu, je utvrđivanje merodavnih vrednosti stepena sigurnosti protiv proklizavanja kao značajnog parametra pri projektovanju ovakvih uređaja.

LITERATURA

- [1] ANDREEV A.: *Peredača trenjem*, "Mašinostroenie", Moskva, 1978.
- [2] VLADIĆ J., BABIN N., ŠOSTAKOV R.: *Problematika pogonskog mehanizma u sistem prenosa snage putem trenja*, IV Severov simpozijum o prenosnicima, Subotica, 1993.
- [3] VLADIĆ J. *Prilog određivanju stepena sigurnosti protiv proklizavanja dinamički opterećenog užeta u sistemu prenosa snage pogonskom užnicom*, Magistarski rad, Novi Sad, 1982.
- [4] JOST, H. P.: *Ekonomy impact of Tribology*, Proceeding of 20th Meeting of M.F.P.G., 1976.
- [5] SOVILJ B.: *Identifikacija triboloških procesa pri odvalnom glodanju*, Doktorska disertacija, FTN, Novi Sad, 1988.
- [6] TANASIJEVIĆ S.: *Tribologija u konstruisanju*, Tribologija u industriji, god. XII br.1, 1990.

Трибологические характеристики передачи мощности код специфических транспортных машин

This article deals with the problem of friction power transmission by special transport devices (elevators, ropeways etc.). The wearing processes on the contact surface of steel rope and driving pulley have directed influence on the transmitted force magnitude and the reliability of devices with this type of power transmission. The expressions for the boundary cases of elastic slip of the rope on the pulley surface were formed for diverse contact surface parameters, and the experimental verification was performed

Трибологические характеристики передачи мощности тreniem в специфических трибологических машинах

В работе рассматриваемый вопрос передачи силы способом трения в специфических транспортирующих машинах (лифтах, подвесных канатных дорогах и т.д.). Трибологические процессы между контактирующими поверхностями стального каната и приводного канатного шкива оказывают влияние на величину тяговой силы, т.е. на надежность работы транспортирующих установок. Альгоритмы построены выражения для граничных случаев упругого скольжения каната по поверхности приводного канатного шкива для различных параметров контактных поверхностей.

*ARSOVSKI, M. BABIĆ, B. JEREMIĆ,
B. VASILJEVIĆ*

ISTRAŽIVANJA

Simulation Model for Application of Contact Layers Modification Procedures

1. INTRODUCTORY REMARKS

Surface modification procedures were, up to now, mostly analyzed from the technical - technological aspect. If there were some other and significant approaches, mainly was analyzed the effectiveness of application of the modified parts. That approach is satisfactory if the input values (the so called input vector or the input) are the same for different modified systems. That can be met very seldom in practice, thus the estimate of modified parts performances must be expressed through the family of efficiency indicators. This same approach has to be applied also to parts for which the regeneration of certain surfaces is done.

The input vector contains all the costs of the direct, indirect and past labor, starting from the preparation phase, all the way to building in the regenerated part and/or modified part into the real technical system. The output vector includes the most important characteristics of technical system behavior, like reliability, working life, availability, and group of parameters whose characteristic representative is the price of the technical system.

In this paper are given the fundamentals of the model for estimation of efficiency of the modified parts that are used in real tribomechanical systems and some results of efficiency simulation, with the rank of the influential input values.

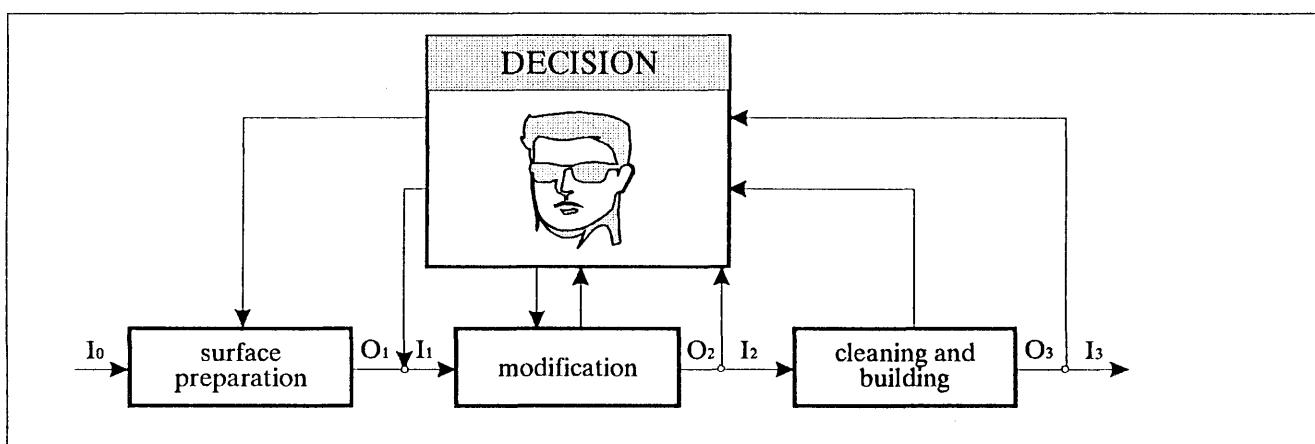


Figure 1. Phases of surfaces modification

Faze modifikovanja površina

Этапы модификации поверхности

Prof. dr Slavko Arsovski, dipl. ing.,

Doc. dr Miroslav Babić, dipl. ing.

Prof. dr Branislav Jeremić, dipl. ing.

Doc. dr Bogdan Vasiljević, dipl. ing.

2. FUNDAMENTALS OF THE SURFACES MODIFICATION SIMULATION MODEL

The simulation model for surface modification must include all the activities of modification:

- the PVD procedure,
- ion implementation, and
- solid lubricants.

Each of component input vectors I_i and output O_i are specified in the further description with definitions of simulation values. In Figure 1 are show phases of surfaces modification.

2.1. Surface preparation

- (1) Direct labor on degreasing of surfaces - DRODP
- (2) Indirect labor on degreasing of surfaces - IRODP
- (3) Past labor contained in material for surfaces preparation MRO1
- (4) Past labor contained in the basic part material MROM
- (5) Other indirect labor that is spent in industrial system IRPR

Figure 2 shows the model of surfaces preparation.

2.2. Surface modification

The input vector for the surface modification can be regarded as the vector which: - contains only the past labor for services of surface modification that are executed by companies with the adequate equipment, and - contains all components of the spent labor (direct, indirect and past) for analysis of efficiency of modification in the company where this procedure is being realized.

Taking into account that the coordinator of investigations does not posses the adequate equipment for modification in this phase of work on the project, we shall analyze the second approach.

2.3. Cleaning and building of the modified part in the real technical system

Simulation model for this phase is shown in Figure 3. This phase contains:

- (1) Cleaning of the part
- (2) Building in of the modified part
- (3) Past labor contained in the value of the technical system

2.4. Total spent labor

Structuring of the total spent labor (TSL) was done to:

- (1) Labor related to the unit product
- (2) Labor related to the series of products
- (3) Labor related to the annual quantity of production.

Structuring of total spent labor was performed according to Figure 4.

2.5. Output from the observed technical system

As it was said earlier, the output vector from the observed technical system contains:

- (1) Price of the technical system together with the built in modified part (C_e)
- (2) Working life of the modified part (T_v)
- (3) Reliability of work of the modified part (A).

Efficiency of the modification procedure can be expressed by relations:

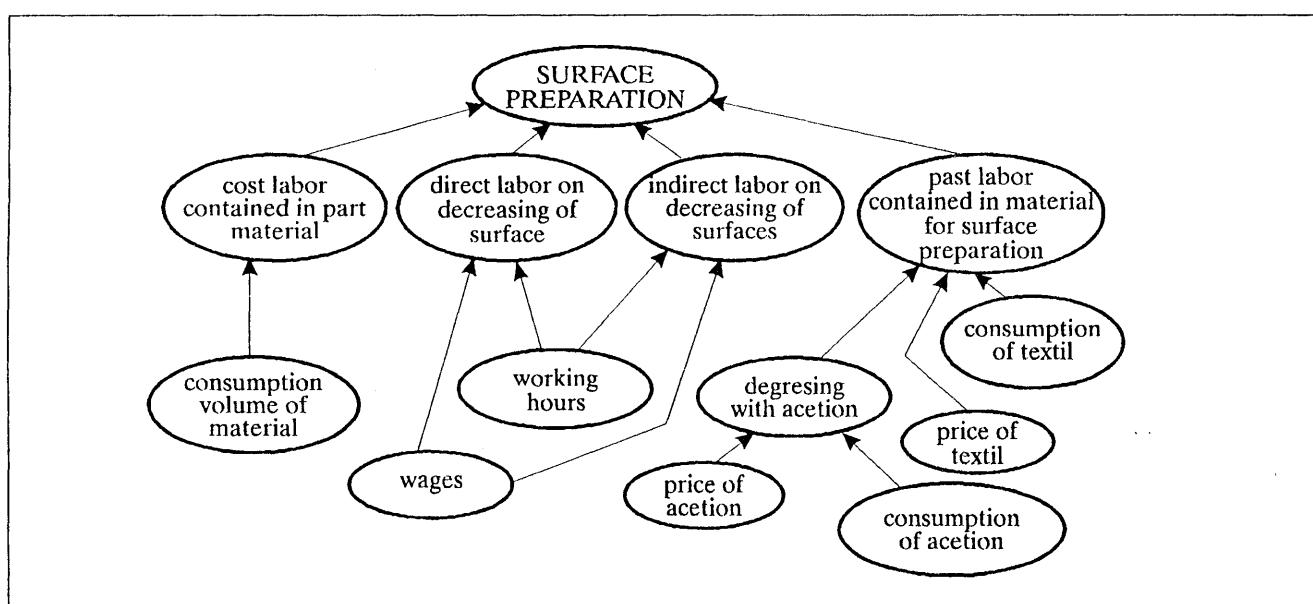


Fig. 2. Model of surfaces preparation
Model pripreme površine
Модель подготовки поверхности

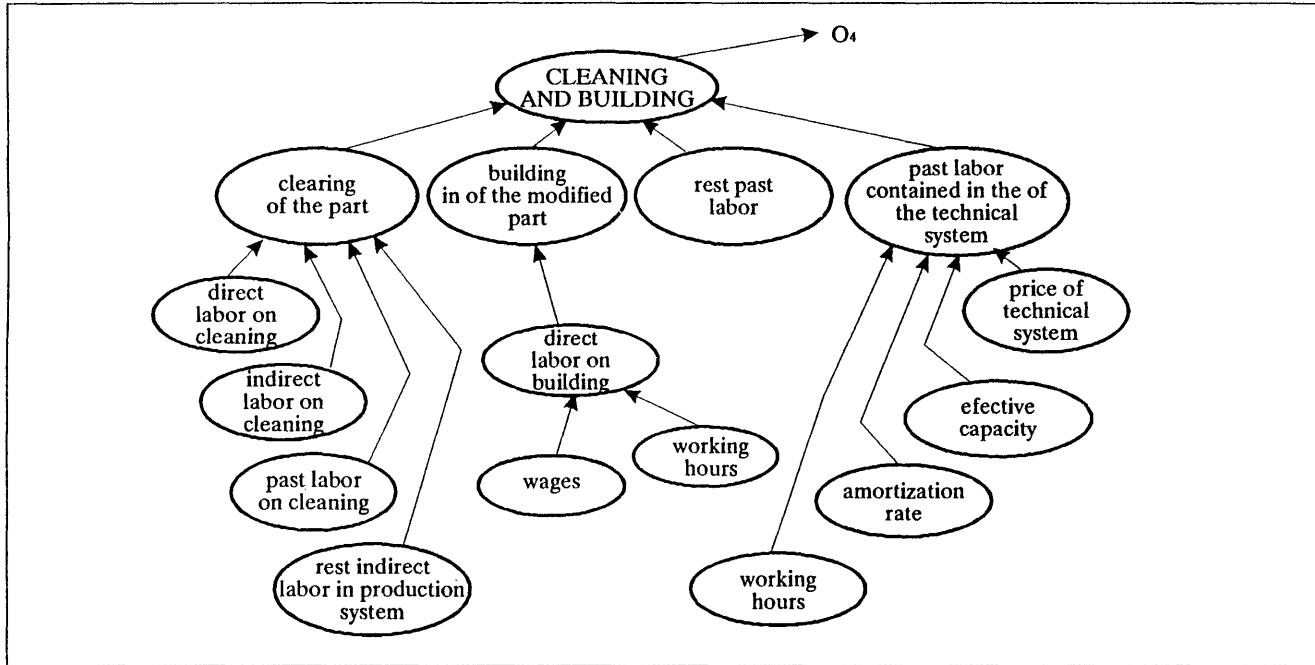


Fig. 3. Model of surfaces cleaning and building in the modified parts into the real technical system

Model čišćenja površina i ugradnje modifikovanih delova u realni tehnički sistem

Модель очистки поверхности и установки модифицированных деталей в действующую техническую систему

$$E_1 = \frac{O_{41}}{I} = \frac{P}{I} = \frac{N_r}{TSL}$$

$$E_2 = \frac{O_{42}}{I} = \frac{C_e}{TSL}$$

$$E_3 = \frac{O_{41}}{I} = \frac{A}{I} = \frac{T_u}{TSL}$$

where: $\frac{N_r}{N_0}$ - observations of the system works and total number of observations,

$\frac{T_r}{T_u}$ - is the ratio of total working time of the system and total available time. For each of the efficiency indicators, E_1 , E_2 , and E_3 the total spent labor is:

$$TSL = TLP + TLSER \cdot Q + TLANN \cdot S \cdot Q$$

where: Q [part/ser] - series size of parts that are being modified

S [ser/year] - number of series per year.

3. SIMULATION RESULTS

At the beginning of simulation the initial values were determined if the input elements in the efficiency model.

If the values of the output from the technical system before the modification are: $T_v = 4000 h$

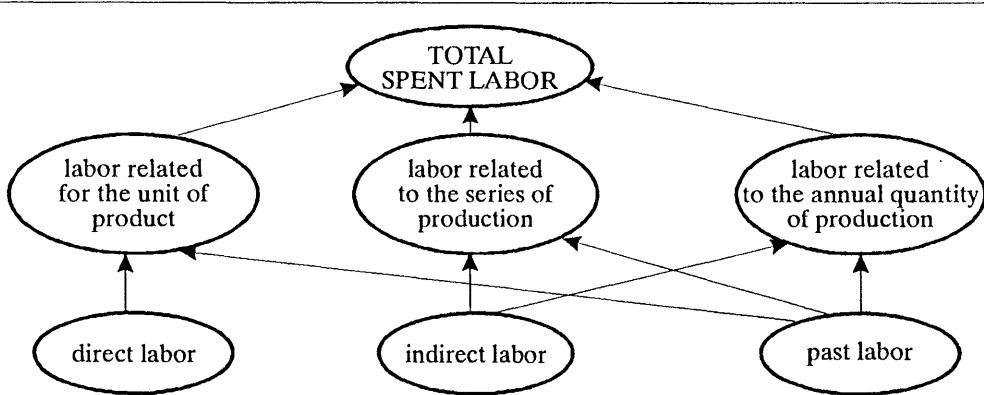


Fig. 4. Model of total spent labor

Model ukupno utrošenog rada

Модель суммарной потребляемой рабочей

$$Ce = 10\,000 \text{ DM}$$

$$P = 0.7$$

$$A = 0.8$$

and after the modification

$$Tv = 4800 \text{ h}$$

$$Ce = 10\,050 \text{ DM}$$

$$P = 0.84$$

$$A = 0.88$$

values of the efficiency index have the form (Figure 5):

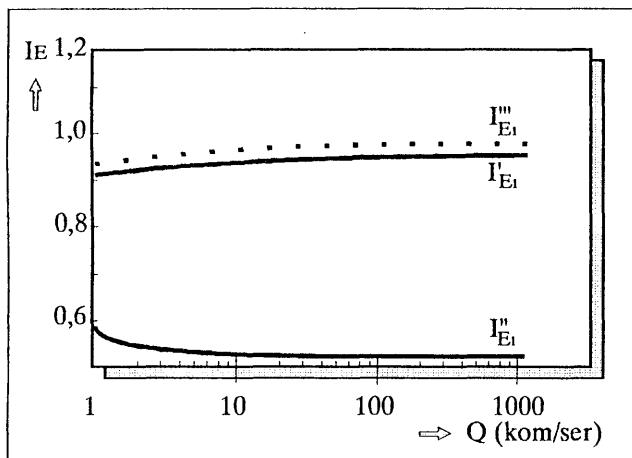


Fig. 5. Efficiency index from the aspect of reliability

Indeks efikasnosti sa aspekta pouzdanosti
Показайель эффеіквіносїї в аспекте надёжности

$$I_{E_1} = \frac{\frac{48}{10\cdot 50} \cdot \frac{1}{A + \frac{42}{Q}} - \frac{1.14(20.2 + \frac{3.6}{Q})}{A + \frac{4.2}{Q}}}{\frac{1}{20.2 + \frac{3.6}{Q}}}$$

Since in the total price of the modified technical system the value of the modified part is very small (about 1%) it can be said that, from the aspect of the working life, the

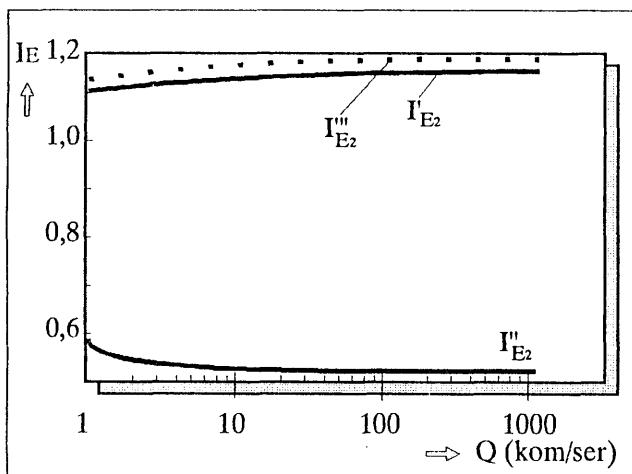


Fig. 6. Efficiency index from the aspect of price

Indeks efikasnosti sa aspekta cene
Показайель эффеіквіносїї в аспекте цены

limiting value of application of the modification procedure is:

- for solid lubricants:

$$T_{vM} = 1.24 \cdot T_{vN}$$

- for ion implementation:

$$T_{vM} = 2.47 \cdot T_{vN}$$

- for application of the TiN coatings: $T_{vM} = 1.23 \cdot T_{vN}$

The efficiency index I_{E_2} has the value (Figure 6):

$$I_{E_2} = \frac{P_M}{P_N} \frac{UUR_N}{UUR_M} = \frac{0.084}{0.70} \frac{20.2 + \frac{3.6}{Q}}{A + \frac{4.2}{Q}} = \frac{1.2 \cdot (20.2 + \frac{3.6}{Q})}{A + \frac{4.2}{Q}}$$

The efficiency index I_{E_3} has the value:

$$I_{E_3} = \frac{A_M}{A_N} \frac{UUR_N}{UUR_M} = \frac{0.088}{0.80} \frac{20.2 + \frac{3.6}{Q}}{A + \frac{4.2}{Q}} = \frac{1.1 \cdot (20.2 + \frac{3.6}{Q})}{A + \frac{4.2}{Q}}$$

In Figure 7 is shown the change of the efficiency indices of the modified surfaces.

The limiting availabilities are:

$$\frac{A_M}{A_N} = \frac{A + 0.42}{20.2 + 0.36} = \frac{A + 0.42}{20.56}$$

From analysis of the critical values one can conclude that by application of the modification procedure of coating with the TiN layer and application of the solid lubricants in all analyzed cases the higher level of efficiency is achieved. With application of the ion implementation it is very difficult to ensure simultaneously:

- increase of working life for 2.37 times,
- increase of reliability for 2.17 times,
- increase of availability for 2.17 times.

In order to ensure all these conditions for economic application of ion implementation, it is necessary to apply this procedure

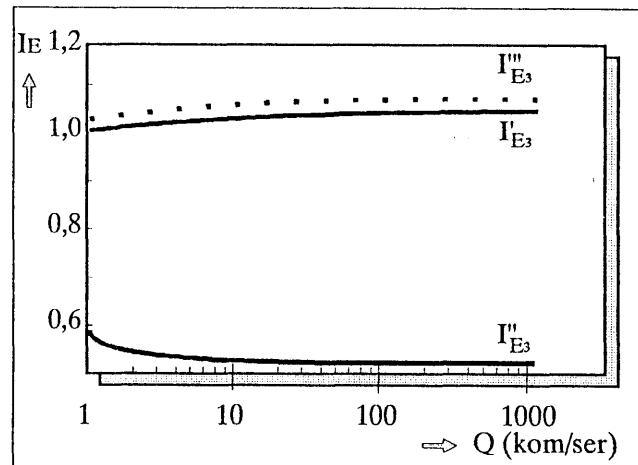


Fig. 7. Efficiency index from the aspect of availability

Indeks efikasnosti sa aspekta raspoloživosti
Показайель эффеіквіносїї в аспекте возможностї и использования

- for parts that are characterized by low reliability, availability, and working life (ratio 1 : 2.5), when the surface to which the ions are applied is smaller, (in the chosen example that is the surface of 1 cm²). This is the rare case in real tribomechanic systems.

4. CONCLUSIONS

From all that is said before the following conclusions can be drawn:

- The regeneration and modification procedures must also be analyzed from the standpoint of the input - output analysis, i.e., efficiency;
- The output vector must include all the types of the spent labor, i.e., direct, indirect and past;
- The output vector must include the price of the revitalized technical system, its working life, reliability, and availability;
- By simulation of efficiency it was concluded that the values of the efficiency indices, by application of the regenerated parts, are greater than 1, and that the curves are "saturated" after the series size of Q = 100 pc/series;
- In the modification procedure the biggest influence has the type of modification. Three procedures were

analyzed: application of the TiN coatings, ion implementation, and solid lubricants;

- Application of the TiN coatings and solid lubricants realizes the greater levels of efficiency;

For application of ion implementation for simulated values of the input variables, in order to realize the efficiency coefficient greater than 1, it is necessary the working life to be 2.37 times, and reliability and availability to be 2.17 times greater. This means that in choosing the parts for the ion implementation the priority should be given to parts that possess low reliability, availability, and working life.

REFERENCES

- [1.] VAN COURT, H., *System Analysis: A Diagnostic Approach*, Harcourt Brace Jovanovic & World Inc., New York, 1967.
- [2.] HALL, A., *Metasystems Methodology*, Pergamon Press, New York, 1989.

U radu se saopštavaju neki rezultati istraživanja na projektu IE 1112 koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije.

Simulacioni model za primenu postupaka modifikovanja kontaktnih površina

U tehničke sisteme ugrađuje se veći broj elemenata sa različitim tribološkim svojstvima. Da bi se povećao životni vek elemenata i tehničkog sistema u celini, kao i pouzdanost i raspoloživost i smanjili troškovi održavanja, koristi se veći broj tehnologija. U ovom radu posebno je razmatran proces modifikacije.

Pri dizajniranju tehničkih sistema vrlo je važno odrediti ponašanje posmatranog sistema "ex ante" i to sa različitim aspektima. Korišćenjem predloženog simulacionog modela analizirana je efikasnost modifikacije i određen rang značajnosti uticajnih veličina.

Симулирующие модели применения способа модификации контактных поверхностей

В технические системы устанавливаются множество деталей с различными трибологическими свойствами. Чтобы продлить срок службы деталей и технической системы в целом, вместе с повышением их надёжности и возможностей использования, и уменьшить расходы обслуживания, в практике применяются разные технологические приёмы. В настоящей работе особенно подробно рассматривается процесс модификации.

При оформлении дизайна технических систем очень важным является определение наблюдаемой системы "ex ante" и при этом в разных аспектах. При применении предложенной симулирующей модели в работе провели анализ эффективности модификации и определили ранг значимости действующих величин.