

tribologija u industriji

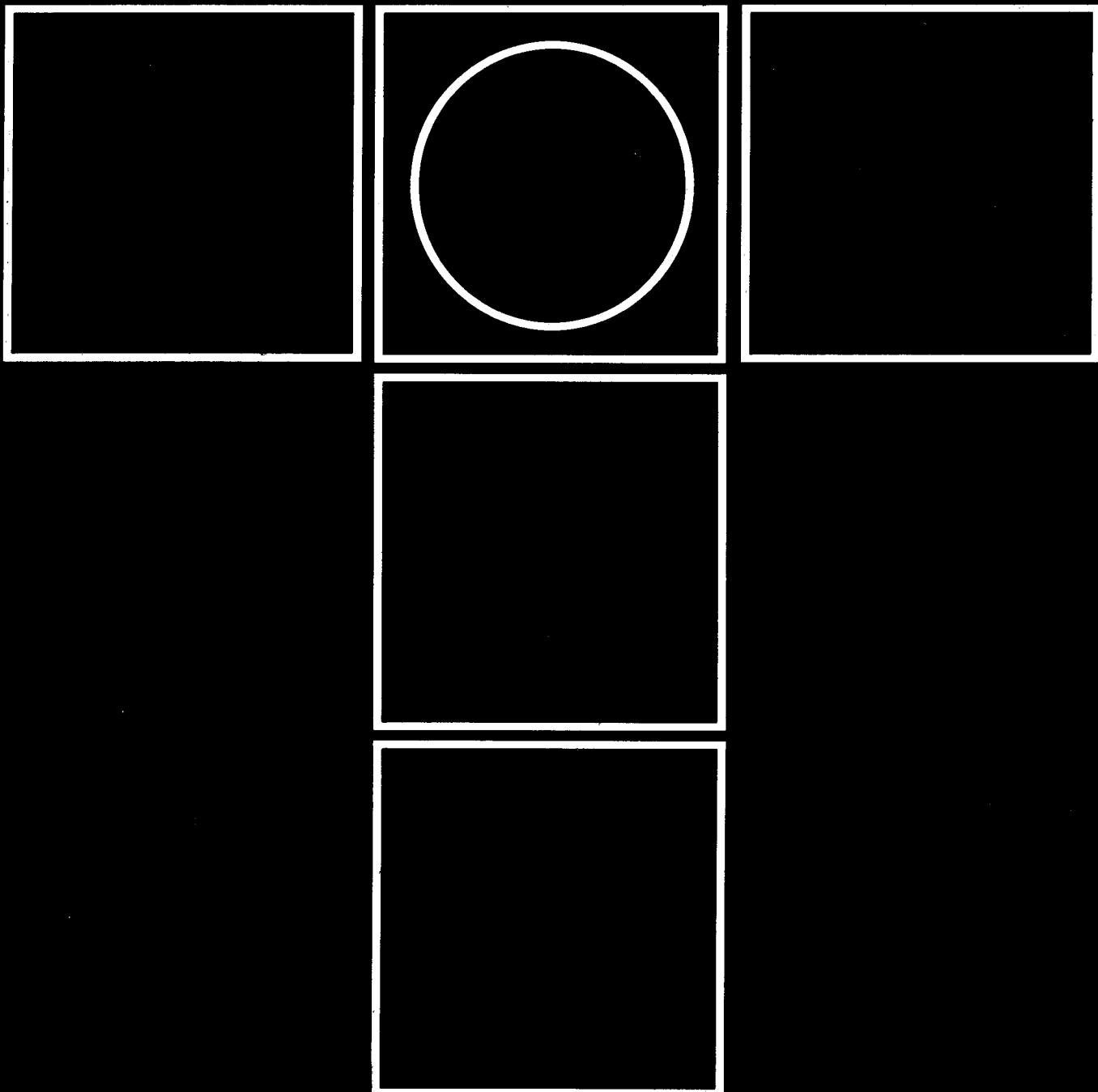
tribology in industry ◇ трибология в промышленности

YU ISSN 0351-1642

GODINA XVII

MART 1995.

1



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. JEREMIĆ: Terotehnologija, značaj i ciljevi ◊
Terotechnology, importance and goals ◊
Теротехнология, значение и цели 3

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

- S. I. CHERNYKH, YU. V. SKORYNIN, LJ. PAPIĆ: Identifikacija i komparativna analiza različitih konstrukcija regulacionih oslonaca rotornih sistema ◊ Identification and Comparative Analysis of Different Constructions of Rotor Systems Regulative Supports ◊ Идентификация и сопоставительный анализ различных конструкций регулирующих опор роторных систем 5

- P. KOVAČ, L. ŠIĐANIN: Uticaj procesa nastajanja strugotine na stanje obradene površine ◊ Influence of The Shavings Formation on The Machined Surface State ◊ Влияние процесса стружкообразования на состояние обработанной поверхности 12

- B. NEDIĆ, V. V. KUZIN, R. JEĆMENICA, F. V. POPOV:
Perspektive korišćenja reznih alata od silicijum nitridne keramike sa ciljem povećanja efektivnosti obradnih procesa ◊ Perspectives of Applications of the Cutting Tools Made of Silicon Nitride Ceramics for the Purpose of Machining Processes Efficiency Increase ◊ Перспективы использования режущего инструмента из кремнисто-нитридной керамики с целью повышения эффективности процессов резания 18

NOVOSTI
NEWS
НОВОСТИ

- Tribološka kampanja 28

KNIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ

- 29

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ

- 32

Terotehnologija, značaj i ciljevi

Prema najnovijim analizama naučnih institucija industrijski razvijenih zemalja, poslednje godine ovog veka će biti godine razvoja novih tehnologija i optimizacije korišćenja raspoloživih resursa. Aspekt optimizacije korišćenja je prvenstveno baziran na terotehnologiji, odnosno tehnologiji održavanja postojećih tehničkih sistema. Relevantne činjenice koje definišu značaj terotehnologije vezane su za:

Kvalitet. Nivo i konstantnost kvaliteta proizvoda apsolutno su zavisni od nivoa održavanja proizvodne opreme. Ovo je u potpunosti bazirano na standardu JUS ISO 9000, odnosno seriji standarda JUS ISO 9004, tačka 11.3 stav 3., koji glasi: (Radi osiguranja stalne sposobnosti procesa, treba izraditi program preventivnog održavanja. Naročitu pažnju treba posvetiti karakteristikama opreme koje imaju uticaja na ključne karakteristike kvaliteta proizvoda.)

Produktivnost. Vreme ispravnog stanja tehničkih sistema, odnosno proizvodne opreme, je bitan faktor u ostvarivanju željene produktivnosti. Maksimalno vreme ispravnog stanja (kroz optimalno ulaganje) postiže se planiranim aktivnostima održavanja.

Profit. Svaki dinar se jedino može sačuvati kroz efikasnije korišćenje energije i duži rad opreme. Najvećim delom ovo se postiže pravilnim održavanjem.

Zaštitu životne sredine. Strožji uslovi u pogledu zaštite životne sredine nameću i značajniju pažnju koju ovo me pitanju treba posvetiti. Ovo se u prvom planu odnosi na sve tehničke sisteme koji zbog promene nivoa sposobnosti za rad dovode do proizvodnje ili ispuštanja materija štetnih po okolinu. Pravilnom tehnologijom održavanja se u značajnijoj meri može poboljšati zaštita životne sredine.

Sigurnost. Postoje takvi procesi i tehnički sistemi u industriji gde se pri nastanku otkaza mogu dogoditi havarije i tragedije većih razmara. Ovo se odnosi na eksplozije i požare, a paralelno i na kobne posledice za one koji rukuju ovim sistemima. Sve se ovo može sprečiti primenom pravilne tehnologije održavanja.

Poboljšanje karakteristika tehničkih sistema. Današnji nivo razvoja tehnike i tehnologije ukazuje na brzo zastarevanje tehničkih sistema u smislu njihove sposobnosti da zadovolje savremene trendove pri eksplotaciji (proizvodnost, bezbednost itd.). Izvođenjem određenih aktivnosti održavanja kroz modifikaciju i rekonstrukciju mogu se zastarem sistemima poboljšati eksplotacijsko tehničke karakteristike.

Iz prethodno navedenog mogu se sagledati strateški ciljevi kod definisanja zadataka iz oblasti sistema održavanja. Pri tome uvek na umu treba imati činjenicu da je opšti kriterijum cilja sa

aspekta održavanja vezan za maksimiziranje izlaza iz proizvodnog sistema kroz povećanje efektivnosti opreme uz zadržavanje konstantnog nivoa ulaznih resursa (radna snaga, oprema, materijal itd.). Kod složenih tehnoloških procesa za čije odvijanje se koristi oprema visokog nivoa optimizacije, umanjuje se uticaj radnika na kvalitet odvijanja proizvodnog procesa. U takvim uslovima, kod upravljanja izlazom iz proizvodnog sistema, najveću ulogu ima stanje proizvodne opreme kao mera uspešnosti održavanja. Rezultati sprovedenih istraživanja vezanih za ocenu nivoa uspešnosti održavanja u zemljama zapadne Evrope i USA ukazuju da se od ukupnih ulaganja u ovu dejavnost nepotrebno troši oko 1/3 novčanih sredstava. Razlog za ovo leži u činjenici da se:

- nedovoljno koristi raaspoloživo radno vreme (50%) svih učesnika na održavanju,
- samo 1/3 svih proizvodnih sistema koristi planiranje izvođenja aktivnosti na poslovima održavanja,
- kod proizvodnih sistema sa planiranjem aktivnosti održavanja preko radnih naloga samo 1/3 prati nivo izvršenja, što u odnosu na ukupan broj proizvodnih sistema iznosi oko 10%,
- samo kod 10% proizvodnih sistema prati uspešnost održavanja, a informacije, ovako dobijene, koriste se za donošenje upravljačkih akcija vezanih za sprečavanje otkaza i smanjenje troškova,

- zbog nedovoljnog planiranja aktivnosti uvodi prekovremeni rad na održavanju,
- preventivno održavanje uspešno koristi samo kod 25% proizvodnih sistema,
- kod 75% proizvodnih sistema koriste elementarni oblici preventivnog održavanja (čišćenje i podmazivanje),
- ne koriste elementarne informacije za uspostavljanje relacija između tehničkih sistema i osoblja koje radi na njihovom održavanju,
- skoro uopšte ne prate troškovi potrošnog materijala na održavanju, loše planiraju rezervni delovi i plaćaju visoke kamate i troškovi skladištenja
- pojavljuju veoma visoki troškovi zbog neostvarenja proizvodnje i isti mogu biti 2-15 puta veći od troškova otklanjanja otkaza.

Kada se zna način pristupa kod rešavanja tehničkih problema u razvijenim zemljama Zapada, onda se samo može predpostaviti status održavanja i problemi koji iz toga proizilaze u našoj industriji.

Napred prikazani rezultati istraživanja su realnost koja je prisutna u industrijski razvijenim zemljama. U tim istim zemljama postoje na stotine konsalting centara koji nude (ključ i pouzdane softvere za rešenje svih problema održavanja). Značajne razlike između teorije i prakse nastaju zbog nepostojanja univerzalnog modela za optimalno upravljanje sistemom održavanja. Opšti principi optimizacije sistema održavanja su poznati, a do uspešnijih rezultata u nekom proizvodnom sistemu se dolazi kroz četiri faze i to:

1. Snimanje i analiza stanja,
2. Projektovanje sistema održavanja prema postavljenim kriterijumima cilja,
3. Uvođenje projektovanog sistema
4. Ocena uspešnosti i otklanjanje uočenih nedostataka.

Navedene aktivnosti može jedino da realizuje tim sastavljen od stručnjaka iz oblasti tehnologije održavanja, upravljanja sistemima održavanja, informatike i inženjerske ekonomije.

Kod preduzeća srednje veličine, optimizacija kompletног sistema održavanja se može završiti za period 2-4 godine. Na taj način se dolazi do savremenog koncepta održavanja u kome su u potpunosti zastupljeni sve relevantni činioci, kao što su:

- upravljanje (organizacija, planiranje i objektivizacija ciljeva itd.)
- tehnologija (preventivne aktivnosti, monitoring, tehnička dijagnostika, metode otklanjanja otkaza itd.)
- sistemski podrška (informatika, planiranje i kontrola izvršenja aktivnosti, snabdevanje materijalnim resursima, koordinacija itd.)
- upravljanje troškovima (po radnim nalozima, ulaznim resursima itd.).

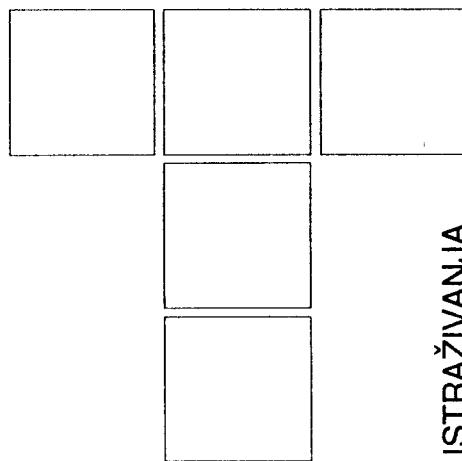
Uz računarsku podršku i već prethodno ostvarenu integraciju relevantnih činioca dolazi se do kompjuterizovanog upravljanja sistemom održavanja (CMMS - Computerized Maintenance Management System), kao najsavremenijeg pristupa u oblasti teroteknologije.

Terotechnology, importance and goals

According to the newest analyses of scientific institutions in industrially developed countries, the last years of this century are going to be the years of the new technologies development and optimization of available resources application. The aspect of application optimization is based, firstly, on terotechnology. i.e., the maintenance technology of the existing technical systems. The general criterion of goals, from the aspect of maintenance is related to maximization of outputs from the manufacturing system through increase of equipment efficiency with maintaining the constant level of the input resources (labor, equipment, material, etc.).

Теротехнология, значение и цели

Согласно новейшим анализам научных учреждений в развитых странах, последние годы настоящего века будут годами развития новых технологий и оптимизации использования имеющихся ресурсов. Аспект оптимизации использования будет преимущественно оправдываться на теротехнологии со всей естественно обслуживания существующих технических систем. Общие критерии цели в аспекте эффективности оборудования при сохранении постоянного уровня входных ресурсов (рабочая сила, оборудование, материал и прочее).



**S. I. CHERNYKH, YU. V. SKORYNIN,
LJ. PAPIĆ**

Identifikacija i komparativna analiza različitih konstrukcija regulacionih oslonaca rotornih sistema

ISTRAŽIVANJA

Pri mehaničkoj obradi materijala, jedan od osnovnih izvora dinamičkog opterećenja alatne mašine je periodična promena parametara preseka poprečnog (smičajnog) sloja i neuravnoteženost obrtnih elemenata. Pod dejstvom dinamičkih opterećenja nastaju relativna pomerenja (odstupanja) alata i obrađivanog dela, koja dovode do pogoršanja kvaliteta obrađivanih delova. Efektivan pravac sniženja nivoa vibracija u zoni obrade predstavlja usavršavanje konstrukcija vreteništa, koja se u nizu slučajeva mogu posmatrati kao rotorni sistemi sa apsolutno krutim rotorom i elastično-prigušenim osloncima. Parametri oslonaca rotora, koji imaju značajan uticaj na dinamiku takvih rotornih sistema, su parametri koji karakterišu krutost i amortizacionu sposobnost. Problem se sastoji u traženju takvih konstrukcionih rešenja, koja bi obezbedila visoke vrednosti pokazatelja tačnosti rotornog sistema na račun njegove "adaptacije" na dejstvujuća opterećenja putem automatske regulacije krutosti i elastičnosti oslonaca u širokom dijapazonu, u skladu sa promenama dejstva, opterećenja.

Kod vreteništa mnogih alatnih mašina koriste se precizni radikalni kuglični kotrljajni ležaji, čiji koeficijenti krutosti i viskoznoelastičnog otpora zavise od tipa ležaja, veličine prethodnog osnog i radikalnog preklopa, načina postavljanja prstenova na vratilo i u kućište, frekvencije obrtaja rotora, sredstva za podmazivanje i geometrijskih grešaka. Uticaj nabrojanih faktora na koeficijent krutosti i otpora oslonaca je različit. Najširu primenu imaju kon-

strukcionala rešenja zasnovana na regulaciji krutosti kotrljajnih oslonaca na račun promene aksijalnog preklopa. Ipak, promena preklopa ne dozvoljava u širokom dijapazonu regulaciju krutosti i dissipativnih svojstava oslonaca, zato što sa povećanjem preklopa raste temperatura podsklopa uležištenja i smanjuje se njegova trajnost [1]. Pored toga, promenu veličine preklopa prati promena spektralnog svojstva dinamičkih poremećaja, izazvanih greškama na elementima ležaja. Ovu promenu je teško prognozirati zbog velikog broja faktora koji utiču na kinematiku kotrljajnog ležaja. Zato, korišćenje u svojstvu dejstva na rotorni sistem, sa upravljačkom ulogom, ima ograničene mogućnosti, iako ima nesumnjivi značaj za rotorne sisteme kod kojih su dejstva opterećenja i procesi promene vrednosti parametara oslonaca rotora u dovoljno uskim dijapazonima. Prema tome, za rotorne sisteme, koji rade u uslovima širokog spektra dinamičkih opterećenja, treba proučavati nova konstruktivna rešenja, zasnovana, npr., na uvođenju dopunskih elastično prigušnih elemenata u lanac: rotor-ležaj-kućište.

U radu [2] je pokazano da ugradnja elastičnog prstena između spoljašnjeg prstena ležaja i kućišta doprinosi sniženju dinamičkih opterećenja koja, prouzrokovana neuravnoteženošću rotora, deluju na ležaje. Pri ovome se bitno menjaju dinamička svojstva sistema: rotorslonci-kućište, zato što elastični prsten doprinosi "linearizaciji" sistema: rotor-ležaji-kućište. Visokofrekventne komponente spektra vibracija praktično iščezavaju, a niskofrekventne se približavaju harmonijskim i njihove amplitude mogu biti znatno snižene. U novije vreme ovakav postupak poboljšanja dinamike rotornih sistema primenjuje se ne samo kod visokoobrtnih rotora (više od 200 s^{-1}), nego i kod rotora koji se obrću sa frekvencijama manjim od 100 s^{-1} .

Mr. Sergey I. Chernykh, stariji naučni saradnik, Institut za pouzdanost mašina AN Belorusije, Minsk.

Dr. Yuriy V. Skorynin, prof., Institut za pouzdanost mašina AN Belorusije, Minsk.

Dr. Ljubiša Papić, docent, Tehnički fakultet, Čačak, Univerziteta u Kragujevcu.

Pri izboru konstrukcije podsklopova uležištenja, u svakom konkretnom slučaju je neophodno rešavati probleme njihove identifikacije i komparativne ocene radne sposobnosti. Ova pitanja će se razmotriti na primeru oslonaca rotora specijalnog struga. Pošlo se od sledećih zahteva, uslovjenih algoritmom upravljanja procesom obrade delova i opštim zahtevima kod tehnološke opreme, kao što su:

- mogućnost kontrole parametara oslonca i kontinualne regulacije krutosti u procesu obrade po zadatom programu;
- obezbeđenje neophodnog dijapazona promene krutosti i koeficijenta otpora (krutost od: $1 \cdot 10 - 10 \cdot 10 [N/m]$, koeficijent otpora od: $2 \cdot 10 - 6 \cdot 10 [Ns/m]$);
- mogućnost tačnog podešavanja zahtevane veličine krutosti oslonca (tačnost do $0.5 \cdot 10 N/m$);
- očuvanje optimalne veličine preklopa u ležajima pri regulaciji krutosti oslonca;
- obezbeđenje zahtevane trajnosti i pogodnosti za održavanje.

Polazeći od napred navedenih zahteva, razvijene su tri konstrukcije regulacionih elastično-prigušnih oslonaca (UDO-1, UDO-2 i UDO-3), koje karakteriše elastični međuelement. Identifikacija regulacionih oslonaca rotornog sistema u konkretnom slučaju se svodi na eksperimentalno određivanje njihovih elastično-disipativnih parametara (koeficijenata krutosti i viskoznoelastičnog otpora) pri odgovarajućoj proračunskoj shemi. Postoje različite metode određivanja ovih parametara, od kojih se osnovnim smatraju sledeće: metoda modalne analize [3], metoda "obnavljajuće sile" [4], metoda statičke petlje histerezisa [5,6]. Prve dve metode podrazumevaju stvaranje spoljašnjeg dejstva na sistem, dobijanje informacije o njegovoj reakciji na to dejstvo i kasniju obradu eksperimentalnih podataka na bazi teorijskog modela. Ove dve metode imaju dva ograničenja:

- neophodnost korišćenja, radi poremećaja rotornog sistema, vibracionog uredaja, koji pridodaje svoje dinamičke parametre dinamičkim parametrima proučavanog objekta;
- neophodnost, u nizu slučajeva, izmene konstrukcije rotornog sistema za dodavanje poremećajne sile i menjene izlaznog sistema u određenim tačkama.

Uzimajući u obzir teškoće tehničkog i metodološkog karaktera koje prate ove metode, za određivanje koeficijenta krutosti odabrana je metoda statičke petlje histerezisa. Dijapazon promene spoljašnjeg opterećenja je bio od: $20-200 [N]$. Pomeranja su merena induktivnim pretvaračem CIP-2. Koeficijent krutosti određen je preko srednje linije između opterećene i neopterećene grane petlje histerezisa.

Koeficijent otpora izračunava se prema rezultatima obrade eksperimentalno dobijenih vibrograma slobodnih prigušenih vibracija $q(t)$ u skladu sa metodologijom

izloženom u [5]. U tom cilju karakteristika otpora aproksimirana je izrazom:

$$H(\dot{q}) = b |q|^{n-1} \cdot \dot{q}, \quad (1)$$

u kome su b i n - nepoznati koeficijenti. Kao kriterijum za definisanje mogućnosti primene jednačine (1), iskorisćena je ocena linearnosti funkcije

$$Y^* = f(X_i^*),$$

$$\text{gde su: } X_i^* = \log x_i^*, Y_i^* = \log y_i^*.$$

Veličine x_i^* i y_i^* određene su na sledeći način:

$$x_i^* = A_{i-1} + A_i$$

$$y_i^* = A_{i-1} - A_i$$

$$\text{gde su: } A_{i-1} \text{ i } A_i - \text{vrednosti poluraspona, izmerene preko svakog punog ciklusa.}$$

Utvrđeno je da za oslonce UDO-1 funkcije, prikazane tačkama sa koordinatama (X_i^*, Y_i^*) , opisuju se jednacinama oblika:

$$Y^* = K X^* + B,$$

što govori o adekvatnosti karakteristike otpora izrazu (1). U ovom slučaju parametar n određuje se na sledeći način [5]:

$$n = K,$$

a parametar b može se odrediti iz izraza:

$$b = \frac{2^{n-2} \cdot j_p}{I(n) \cdot \omega_E^n} \cdot 10^b$$

gde su: j_p - koeficijent krutosti sistema, određen iz nezavisnog statičkog koeficijenta,
 ω_E - eksperimentalno određena ugaona frekvencija vibracija,

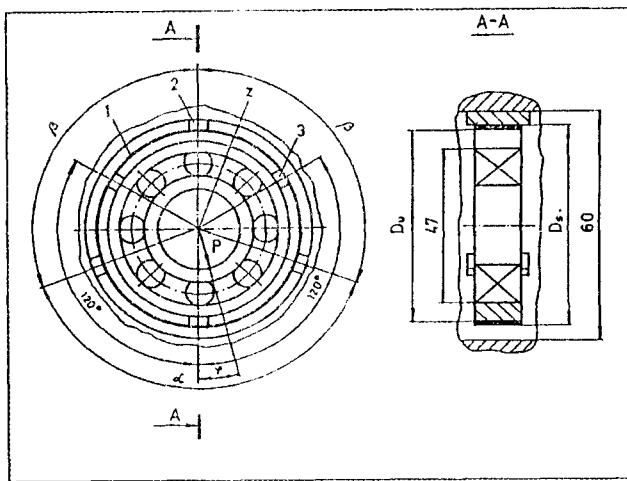
$$I(n) = \int_0^{2\pi} \sin^{n+1} \psi d\psi.$$

Vrednosti $I(n)$ date su u radu [5].

Ekvivalentni koeficijent viskoznoelastičnog otpora h_ϕ određuje se iz uslova energetske ekvivalentnosti [5]:

$$h_\phi = \frac{\int_0^{2\pi} H(A \cdot \omega_0 \sin \psi) \sin d\psi}{\pi A \cdot \omega_E}.$$

Sprovodi se ocena parametara elastično-prigušenog oslonca UDO-1. Na slici 1. je prikazana konstrukcija složenog UDO-1. Njegov osnovni element je elastični prsten (1), snabdeven nizom otvora za učvršćivanje spoljašnjih (2) i unutrašnjih (3) oslonaca. Ugao ϕ je ugao između pravca spoljašnjeg opterećenja i ose simetrije oslonca. Unutrašnji oslonci (3) su u interakciji sa spoljašnjim prstenom ležaja, a spoljašnji oslonci (2) služe za



Slika 1.
Fig. 1.
Puc. 1

interakciju sa kućištem rotornog sistema. Na račun premeštanja spoljašnjih oslonaca (2) po obimu elastičnog prstena postiže se promena centralnog ugla među njima. Unutrašnji prečnik prstena je $D_u=56\text{ mm}$, a njegova širina 18 mm . Ostali parametri konstrukcije UDO-1 dati su u tabeli 1. Parametri krutosti i otpora u pravcu dejstva sile rezanja menjaju se putem obrtanja oslonca oko ose z.

Tabela 1. Konstrukcioni parametri elastično-prigušnog oslonca UDO-1

Debljina prstena d [mm]	Ugao α [$^{\circ}$]	Ugao β [$^{\circ}$]
0.50	160	100
	120	120
	80	140
0.75	160	100
	120	120
	80	140
1.00	160	100
	120	120
	80	140

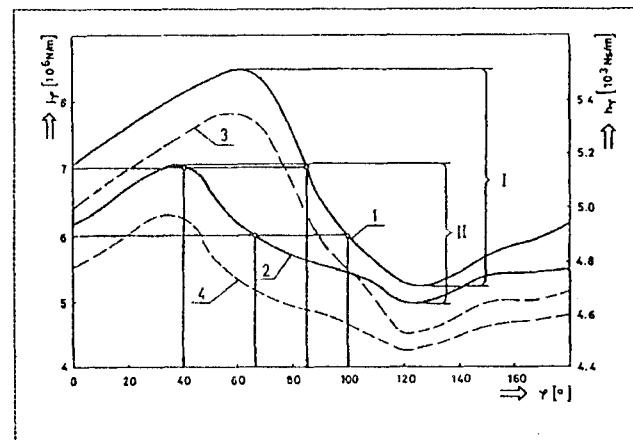
U cilju određivanja uticaja konstrukcionih parametara elastično-prigušnih oslonaca, na vrednosti koeficijenata krutosti i otpora primjenjen je potpuni faktorski eksperiment. Varirani faktori, interval variranja, a takođe faktorski nivoi pri sprovođenju eksperimenta za UDO-1 dati su u tabeli 2.

Tabela 2. Faktorski nivoi pri sprovođenju eksperimenta pri istraživanju elastično-disipativnih parametara oslonca UDO-1

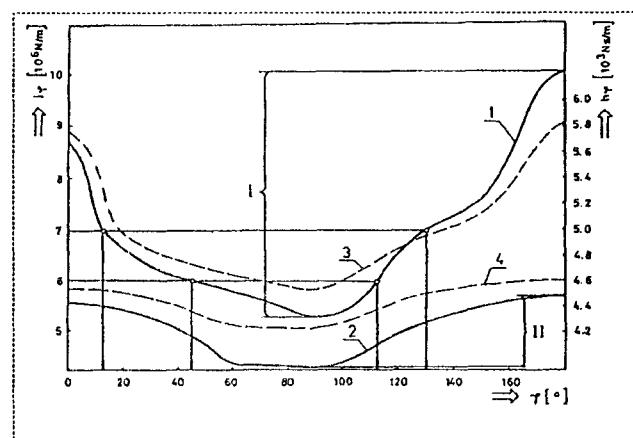
Faktor	Oznaka	Kod	Interval variranja	Faktorski nivo		
				-1	0	+1
Debljina prstena	d [mm]	X ₁	0.25	0.75	0.875	1.0
Centralni ugao	α [$^{\circ}$]	X ₂	80	80	120	160

Zbog toga što se parametri krutosti i otpora oslonaca u pravcu dejstva sile rezanja menjaju pri obrtanju oslonca

oko ose z, za ocenu ove promene sprovedena su dopunska istraživanja sa uzimanjem u obzir uticaja ugla φ između pravca spoljašnjeg opterećenja i ose simetrije oslonca. Na slikama 2. i 3. date su zavisnosti koeficijenta krutosti j_φ (1,2) i koeficijenta otpora h_φ (3,4) oslonca UDO-1 od ugla φ između pravca spoljašnjeg opterećenja i ose simetrije oslonca pri različitim debljinama prstena (1,3 - $d=1\text{ mm}$; 2,4 - $d=0.75\text{ mm}$; I,II - dijapazoni promene koeficijenta krutosti) i to na sl. 2 za ugao $\alpha=80^\circ$ a na sl. 3 za $\alpha=160^\circ$.



Slika 2.
Fig. 2.
Puc. 2.



Slika 3.
Fig. 3.
Puc. 3.

Na osnovu dobijenih podataka mogu se izvesti sledeći zaključci:

1. Konstrukcija UDO-1 obezbeđuje regulisanje koeficijenata krutosti i otpora u dovoljno širokom dijapazu. Pri istraživanjima intervala takvih parametara UDO-1, kao što su debljina prstena i centralni ugao između spoljašnjih oslonaca, obezbeđivana je promena koeficijenta krutosti oslonca od $4.28 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ ($d=0.75\text{ mm}$, $\alpha=160^\circ$, $v=90^\circ$) do $10.1 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ ($d=1\text{ mm}$, $\alpha=160^\circ$, $v=180^\circ$), a pri tome se koeficijent otpora promenio od $4.23 - 5.85 \text{ [kNs/m]}$.

2. Značajan uticaj na veličinu dijapazona promene koeficijenata imao takav faktor kao što je debljina prstena. U slučaju kada je $d=0.75 \text{ mm}$, dijapazon promene koeficijenta krutosti je:

$$4.94 \cdot 10^6 - 7.05 \cdot 10^6 \text{ [N/m]} (\alpha=80^\circ);$$

pri $d=1 \text{ mm}$ - $5.22 \cdot 10^6 - 8.51 \cdot 10^6 \text{ [N/m]}$ ($\alpha=80^\circ$); tj. $(6 \pm 1.05) \cdot 10^6 \text{ N/m}$ i $(6.86 \pm 1.64) \cdot 10^6 \text{ N/m}$ ili -17% i -24% , respektivno. Dopunska istraživanja oslonca UDO-1 sa prstenom debljine $d=0.5 \text{ mm}$ pri centralnom uglu između spoljašnjih oslonaca $\alpha=80$ omogućila su konstataciju da je u ovom slučaju dijapazon promene koeficijenta krutosti od:

$$2.39 \cdot 10^6 - 3.18 \cdot 10^6 \text{ [N/m]}, \text{ tj. } (2.78 \pm 0.39) \cdot 10^6 \text{ N/m ili } -14\% \text{ srednje vrednosti koeficijenta krutosti. Analogne zavisnosti se dobijaju pri centralnom uglu između spoljašnjih oslonaca } \alpha=160 \text{ (slika 3.).}$$

3. Na širinu dijapazona promene koeficijenata krutosti i otpora oslonca značajan uticaj ima veličina centralnog ugla između spoljašnjih oslonaca. U slučaju pri $\alpha=160$ i $d=1 \text{ mm}$, dijapazon promene koeficijenta krutosti oslonca znatno se uvećava i kreće se od: $5.27 \cdot 10^6 - 10.10 \cdot 10^6 \text{ [N/m]}$, tj. $(7.69 \pm 2.42) \cdot 10^6 \text{ N/m ili } -31\%$ srednje vrednosti.

4. Najveći padovi vrednosti koeficijenata krutosti i otpora uočavaju se u dijapazonima promene ugla φ od $70^\circ - 90^\circ$. Relativno širok dijapazon promene ugla φ obezbeđenje tačno podešavanje zadatih vrednosti koeficijenata. Promena koeficijenta krutosti u zadatom dijapazonu od $6 \cdot 10^6 - 7 \cdot 10^6 \text{ [N/m]}$ može biti obezbedena osloncima UDO-1 u tri konstrukcione varijante: ($d=0.75 \text{ mm}, \alpha=80^\circ$); ($d=1 \text{ mm}, \alpha=80^\circ$); ($d=1 \text{ mm}, \alpha=160^\circ$). U prvom slučaju dijapazon promene ugla je $40-67 [^\circ]$, u drugom - $85-100 [^\circ]$ (sl. 2.), a u trećem - zahtevani koeficijent krutosti može biti obezbeđen u dva dijapazona promene ugla φ : $13-45 [^\circ]$ i $113-130 [^\circ]$ (slika 3.). Prednost imaju varijante: $d=1 \text{ mm}, \alpha=160^\circ$, jer u ovom slučaju dijapazon promene ugla φ ima najveću vrednost (32°), što obezbeđuje tačne "ugradnje" koeficijenta krutosti.

Sprovodi se komparativna analiza različitih konstrukcija regulacionih oslonaca UDO-2 i UDO-3.

Konstrukcija UDO-2 je sa elastičnim elementima u formi trougla, kao što je prikazano na slići 4. Elastični elementi su sledećih dimenzija: dužina - 70 mm , širina - 18 mm . Konstrukcija UDO-3 sa regulacijom zakrivljenošću elastičnih elemenata prikazana je na slići 5, gde je 1-lisnata opruga; 2-držač; 3-prsten; 4-kućište, a φ ugao između pravca spoljašnjeg opterećenja i ose simetrije oslonca. Predloženu konstrukciju karakteriše mogućnost regulacije zakrivljenosti elastičnih elemenata (1), koji su u međusobnoj interakciji sa prstenom (3). Elastični elementi su sledećih dimenzija: debljina - 0.3 mm , dužina - 71 mm , širina - 18 mm . Elastično-disipativni parametri UDO-3 zavise od preklopova u vertikalnoj i horizontalnoj ravni i radijusa R udubljenja prstena.

Kod ovih vrsta oslonaca parametri krutosti i otpora u pravcu dejstva sile rezanja regulišu se putem njihovog

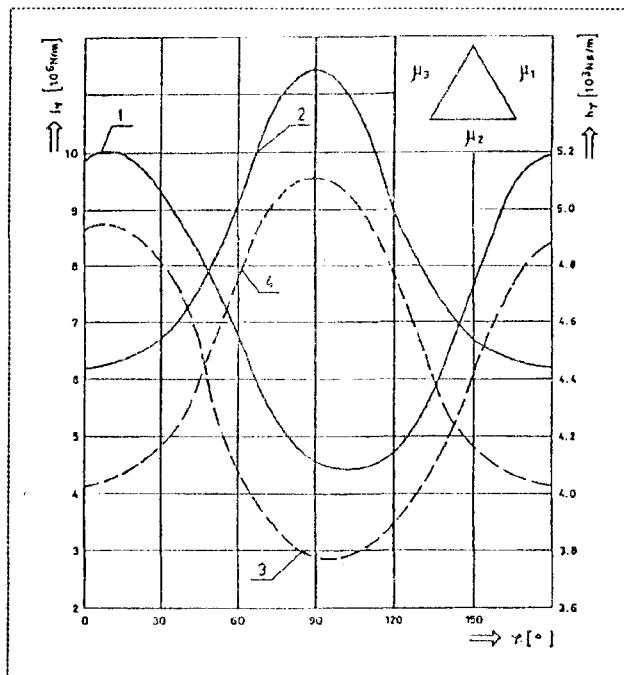
okretanja oko ose z . Potrebno je takođe uočiti dopunske mogućnosti regulacije navedenih parametara korišćenjem, u osloncima UDO-2 i UDO-3, garnitura od nekoliko pljosnatih pločica, a takođe korišćenjem u osloncu pločica različite debljine i od različitog materijala.

U cilju određivanja uticaja konstrukcionih parametara elastično-prigušnih oslonaca UDO-2 i UDO-3 na vrednosti koeficijenata krutosti i otpora primjenjen je potpuni faktorski eksperiment. Dobijeni rezultati obradivani su po izloženoj metodologiji. Varirani faktori, interval variranja, a takođe faktorski nivoi pri sprovodenju eksperimenta dati su u tabelama 3. i 4.

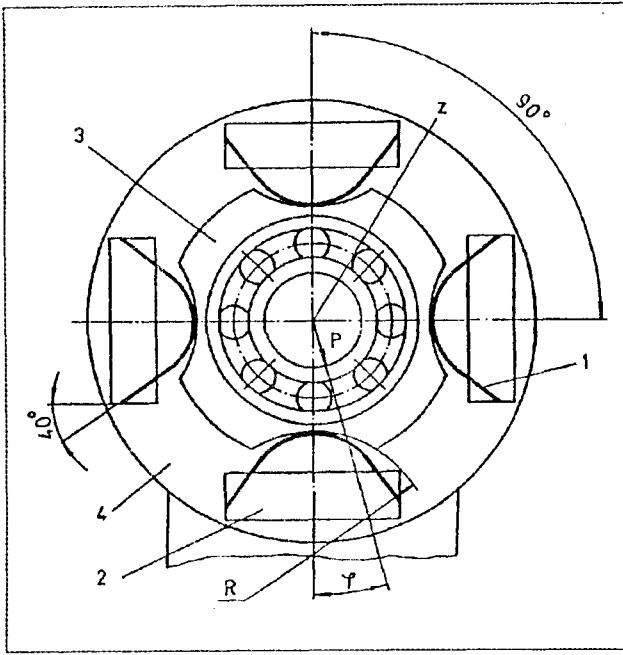
Zbog toga što se parametri krutosti i otpora oslonaca u pravcu dejstva sile rezanja menjaju pri obrtanju oslonca oko ose z , radi ocene ove promene sprovedena su dopunska istraživanja uzimanjem u obzir uticaja ugla φ između pravca spoljašnjeg opterećenja i ose simetrije oslonca.

Na slici 4. je data zavisnost koeficijenta krutosti j_φ (1,2) i koeficijenta otpora h_φ (3,4) oslonca UDO-2 od ugla φ između pravca spoljašnjeg opterećenja i ose simetrije oslonca pri različitim debljinama elastičnih pločica (1,3 - $\mu_1=0.4 \text{ mm}$, $\mu_2=0.6 \text{ mm}$, $\mu_3=0.5 \text{ mm}$; 2,4 - $\mu_1=0.6 \text{ mm}$, $\mu_2=0.4 \text{ mm}$, $\mu_3=0.6 \text{ mm}$). Na osnovu dobijenih rezultata mogu se dati sledeći zaključci:

- Predložena konstrukcija oslonca UDO-2 obezbeđuje regulaciju koeficijenta krutosti u dijapazonu od: $4.45 \cdot 10^6 - 10.05 \cdot 10^6 \text{ [N/m]}$ ili $(7.25 \pm 2.80) \cdot 10^6 \text{ N/m}$, tj. $\pm 38.6\%$ srednje vrednosti ($\mu_1=0.4 \text{ mm}$, $\mu_2=0.6 \text{ mm}$, $\mu_3=0.5 \text{ mm}$). Pri $\mu_1=0.6 \text{ mm}$, $\mu_2=0.4 \text{ mm}$, $\mu_3=0.6 \text{ mm}$ dijapazon regulacije koeficijenta je $(6.26 - 11.40) \cdot 10^6$



Slika 4.
Fig. 4.
Put. 4



Slika 5.
Fig. 5.
Pic. 5

N/m , tj. $(8.83 \pm 2.57) \cdot 10^6 N/m$ ili -29.1% srednje vrednosti koeficijenta krutosti.

2. Najveći pad koeficijenata krutosti i otpora uočava se pri promeni ugla ϕ u dijapazonu od približno 90° . Korišćenje oslonca UDO-2 sa parametrima $\mu_1=0.4 mm$, $\mu_2=0.6 mm$ i $\mu_3=0.5 mm$ obezbeđuje najširi dijapazon regulacije koeficijenta krutosti u poređenju sa osloncem UDO-2, koji ima sledeće parametre: $\mu_1=0.6 mm$, $\mu_2=0.4 mm$ i $\mu_3=0.6 mm$. Korišćenje oslonca UDO-2 sa parametrima: $\mu_1=0.6 mm$, $\mu_2=0.4 mm$ i $\mu_3=0.6 mm$, pri vrednosti ugla ϕ u dijapazonima: $40-80 [^\circ]$, $100-140 [^\circ]$ (slika 4.) omogućuje realizaciju praktično linearne zavisnosti koeficijenata krutosti i otpora i veličine ugla ϕ . Važno je uočiti da pri jednakim vrednostima koeficijenta krutosti koeficijent otpora oslonca UDO-2 je nešto niži nego kod oslonca UDO-1.

Radi dobijanja potpunije informacije o međusobnoj vezi elastično-disipativnih parametara oslonca UDO-3 i karakteristika njegove konstrukcije korišćeni su rezultati potpunog faktorskog eksperimenta 2^3 .

Tabela 3. Faktorski nivoi pri sprovodenju eksperimenta pri istraživanju elastično-disipativnih parametara oslonca UDO-2

Faktori	Kod	Interval variranja	Faktorski nivoi		
			-1	0	+1
Debljina pločice μ_1 [mm]	X ₁	0.2	0.4	0.5	0.6
Debljina pločice μ_2 [mm]	X ₂	0.2	0.4	0.5	0.6
Debljina pločice μ_3 [mm]	X ₃	0.1	0.5	0.55	0.6

Tabela 4. Faktorski nivoi pri sprovodenju eksperimenta pri istraživanju elastično-disipativnih parametara oslonca UDO-2

Faktori	Kod	Interval variranja	Faktorski nivoi		
			-1	0	+1
Preklop u vertikalnoj ravni σ_y [mm]	X ₁	0.3	0.3	0.45	0.6
Preklop u horizontalnoj ravni σ_H [mm]	X ₂	0.3	0.3	0.45	0.6
Radius udubljenja R [mm]	X ₃	20	30	40	50

Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata formirani su sledeći regresioni modeli:

$$Y_1 = 7.8 \cdot 10^5 - 6.6517 \cdot 10^4 X_1 + 2.1758 \cdot 10^4 X_2 - \\ - 2.5083 \cdot 10^4 X_3 + 1.3458 \cdot 10^4 X_1 X_2 + 1.03 \cdot 10^4 X_1 X_3 - \\ - 7.875 \cdot 10^3 X_2 X_3 - 6.858 \cdot 10^3 X_1 X_2 X_3 \quad (2)$$

$$Y_2 = 7.9953 \cdot 10^5 - 9.9342 \cdot 10^4 X_1 - 7.075 \cdot 10^3 X_2 - \\ - 2.8117 \cdot 10^4 X_3 + 1.5233 \cdot 10^4 X_1 X_3 \quad (3)$$

$$Y_3 = 1.9606 \cdot 10^3 - 62.68 X_1 + 8.16 X_2 - 22.5 X_3 + \\ + 6.65 X_1 X_2 - 6.16 X_2 X_3 - 5.09 X_1 X_2 X_3 \quad (4)$$

$$Y_4 = 1.9841 \cdot 10^3 - 78.62 X_1 + 24.96 X_3 + 11.94 X_1 X_3 - \\ - 10.61 X_2 X_3 - 10.85 X_1 X_2 X_3 \quad (5)$$

gde su: Y_1 i Y_2 -koeficijenti krutosti oslonca u pravcu $\varphi=0^\circ$ i $\varphi=30^\circ$, respektivno,
 Y_3 i Y_4 - koeficijenti otpora oslonca u pravcu $\varphi=0^\circ$ i $\varphi=30^\circ$, respektivno,
 X_1 - preklop u vertikalnoj ravni,
 X_2 - preklop u horizontalnoj ravni,
 X_3 - radius udubljenja prstena.

Homogenost disperzija proverena je korišćenjem G-kriterijuma Koherena. Pri broju ispitivanja $N_0=8$, broju stepeni slobode $f=2$ i nivou poverenja $\alpha_3=0.05$ tablična vrednost je $G=0.516$ [7]. Provera statističke značajnosti koeficijenata ostvarena je na osnovu proračuna intervala poverenja koeficijenata regresije pri vrednosti t-kriterijuma Studenta jednakoj 2.12. Hipoteza o adekvatnosti modela proverena je korišćenjem F-kriterijuma (kriterijum Fischer). Provera je pokazala da se hipoteza o adekvatnosti modela (2) - (5), pri 5%-nom nivou poverenja ne odbacuje. U izabranim intervalima promene konstrukcionih parametara oslonca UDO-3 najveći uticaj na elastično-disipativne parametre ima preklop u vertikalnoj ravni.

Na osnovu dobijenih rezultata mogu se izvesti sledeći zaključci:

- U istraživanjima intervala promene parametara UDO-3 obezbeđivana je promena koeficijenta krutosti od $6.783 \cdot 10^5 N/m$ za oslonce sa parametrima $v=0.6 mm$, $H=0.3 mm$ i $R=50 mm$; do $9.425 \cdot 10^5 N/m$ za oslonce sa parametrima $v=0.3 mm$, $H=0.3 mm$ i

$R=30 \text{ mm}$, tj. u dijapazonu $(8.104 \pm 1.321) \cdot 10^5 \text{ N/m}$ ili -16.3% srednje vrednosti. Koeficijent otpora variran je od 18709.9 Ns/m do 2106 Ns/m , tj. u dijapazonu $(1.99 \pm 0.12) \text{ kNs/m}$ ili -6% .

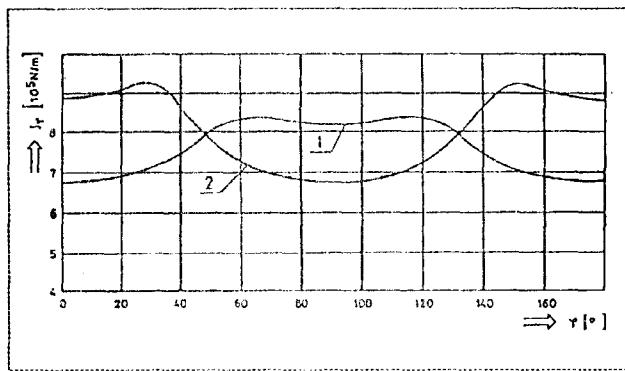
2. Značajan uticaj na elastično-disipativne parametre oslonca UDO-3 ima radijus udubljenja prstena. Smanjenje radijusa udubljenja prstena dovodi do uvećanja koeficijenta krutosti. U najvećoj meri ovaj efekat se ispoljava pri visokim vrednostima preklopa u horizontalnoj ravni i niskim vrednostima - u vertikalnoj ravni, a takođe pri jednakosti veličina preklopa. U ovim slučajevima uočava se uvećanje koeficijenta krutosti na $6-11\%.$

3. Dijapazoni promene koeficijenata krutosti i otpora oslonca UDO-3 pri promeni pravca dejstva spoljašnjeg opterećenja, koji se definiše veličinom ugla φ , nešto su uži nego kod oslonaca UDO-1 i UDO-2. Pri jednakosti veličina preklopa u horizontalnoj i vertikalnoj ravni, širina dijapazona regulacije koeficijenta krutosti ne premašuje -4% srednje vrednosti. Pri realizaciji veličina preklopa u osloncu na račun deformacije lisnate opruge, dijapazoni promene koeficijenata krutosti i otpora uvećavaju se.

Npr., pri smanjenju veličine preklopa u vertikalnoj ravni od 0.6 mm do 0.3 mm dijapazon promene koeficijenta krutosti je $(7.685 \pm 0.902) \pm 10 \text{ N/m}$, pri $R=50 \text{ mm}$ ili -11.7% srednje vrednosti, a pri $R=30 \text{ mm}$ - $(8.105 \pm 1.321) \pm 10 \text{ N/m}$ ili -16.3% srednje vrednosti.

Zavisnost koeficijenta krutosti j_φ oslonca UDO-3 od ugla φ između pravca spoljašnjeg opterećenja i ose simetrije oslonca pri različitim vrednostima preklopa i radijusa udubljenja R (1: $v=0.6 \text{ mm}$, $H=0.3 \text{ mm}$, $R=50 \text{ mm}$; 2: $v=0.3 \text{ mm}$, $H=0.6 \text{ mm}$, $R=30 \text{ mm}$) prikazana je na slici 6.

Na taj način, predložene konstrukcije oslonaca rotora (UDO-1, UDO-2, UDO-3) sa regulišućim elastično-disipativnim parametrima, obezbeđuju dovoljno širok dijapazon regulacije i tačno podešavanje elastično-disipativnih parametara. Ipak, za uslove obrade delova preporučuje se oslonac UDO-2 sa parametrima. $\mu_1=0.6 \text{ mm}$, $\mu_2=0.4 \text{ mm}$ i $\mu_3=0.6 \text{ mm}$, koji obezbeđuje dovoljno širok dijapazon promene koeficijenta krutosti pri praktično, linearnoj zavisnosti ovog koeficijenta od ugla φ .



Slika 6.
Fig. 6
Puc. 6

LITERATURA

- [1] SKORYNIN, YU. V., LEVANTSEVICH, M. A., SHAPAR, V. A.: *Regulirovaniye skorostnykh podshipnikov kacheniya*, Nauka i tekhnika, Minsk, 1989., 165 s.
- [2] ALEKSEYEVA, N.I., KLYUCHKOV, B.F., KORNEYEV, V.N.: *Primeneniye uprugikh podshipnikov opor v shpindel'nikh uzlakh skorostnykh ispitatel'nikh stendov*, Stanki i instrument No. 11, 1979., s. 21-22.
- [3] KRAUS, BLEKH, BRAUN: *Opredeleniye zhystkosti i dempfirovaniya podshipnikov kacheniya v real'nom uzle metodom modal'nogo analiza*, Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroyeniya, Tr. Amer. obshchestva inzhenerov mehanikov No. 2., Mir, Moskva, 1988., s. 236-245.
- [4] KHADZHIYAN, MASRI, SAND: *Obzor metodov nakhozdeniya otsekok ekvivalentnogo dempfirovaniya po dannym eksperimentov*, Teoretisheskiye osnovy inzhenernykh raschytov No. 1., Mir, Moskva, 1988., s. 163-175.
- [5] CHELOMEY, V. N (redaktor) *Vibratsii v tekhnike*, T.2., *Kolebaniya nelineynykh mehanicheskikh sistem*, Spravochnik, Mashinostroyeniye, Moskva, 1979., 351 s.
- [6] PEKELHARING, A.D. *Cutting tool damage in interrupted cutting*, Wear No.1, Vol. 62, 1980., pp. 37-48.
- [7] NOVIK, F.S., ARSOV, YA.B.: *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya ekspeimenta*, Mashinostroyenie-Tekhnika, Moskva-Sofiya, 1980., 304 s.

Identification and Comparative Analysis of Different Constructions of Rotor Systems Regulative Supports

The problem is set in the form of searching the constructive solutions which assure the high values of rotor systems accuracy indicators. Considered are solutions based on adaptation to the acting loads by the automatic regulation of stiffness and flexibility of the regulative supports. The estimation was conducted of parameters of the elasto - damping support UDO-1. In order to determine the influence of the constructive parameters of elasto - damping supports on the stiffness coefficients values and resistance we applied the complete factorial experiment. The comparative analysis was performed of different constructions of regulative supports UDO-2 and UDO-3, of rotor systems. The proposed constructions of rotor supports UDO-2 and UDO-3, as well as UDO-1 with the regulative elasto - dissipative parameters provide wide enough range of regulation and accurate adjustment of elasto - dissipative parameters.

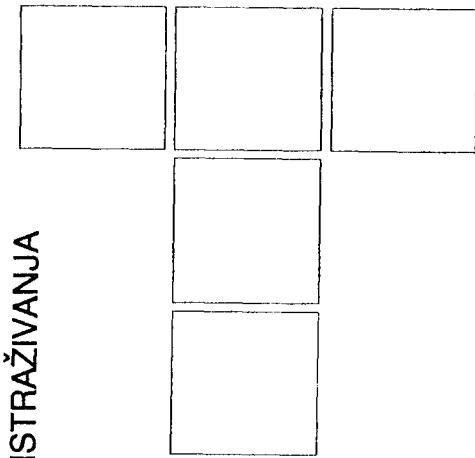
Идентификация и сопоставительный анализ различных конструкций регулирующих опор роторных систем

Работа посвящена поиску конструкционных решений, обеспечивающих высокие показатели точности роторных систем. В работе рассмотрены конструктивные решения, основанные на "приспособлении" к действующим нагрузкам, способом автоматической регулировки жесткости и упругости регулирующих опор. Проведена оценка параметров упруго-демпфирующих опор УДО-1. С целью определения влияния конструкционных параметров этого типа опор на значения коэффициента жесткости и сопротивления применены полный факторный эксперимент. Проведено сопоставление различных конструкций регулирующих опор УДО-2 и УДО-3 роторных систем. Предложенные конструкции опор роторов УДО-2 и УДО-3, а также УДО-1 с регулируемыми упруго-диссипативными параметрами обеспечивают довольно широкий диапазон регулирования наложение упруго-диссипативных параметров.

*Proverite da li je
Vaša radna organizacija
obnovila pretplatu za časopis
"Tribologija u industriji"
za 1995. godinu*

S poštovanjem

Redakcija časopisa



P. KOVAC, L. ŠIDANIN

Uticaj procesa nastajanja strugotine na stanje obradene površine

1. UVOD

Pretvaranje sloja materijala obratka uslovjenog dubinom rezanja d u strugotinu debljine h vrši se u prostoru koji obuhvata deo obratka u blizini reznog kлина alata. Ovaj prostor predstavlja zonu rezanja, a njen položaj, oblik i granice utvrđuju se eksperimentalnim putem.

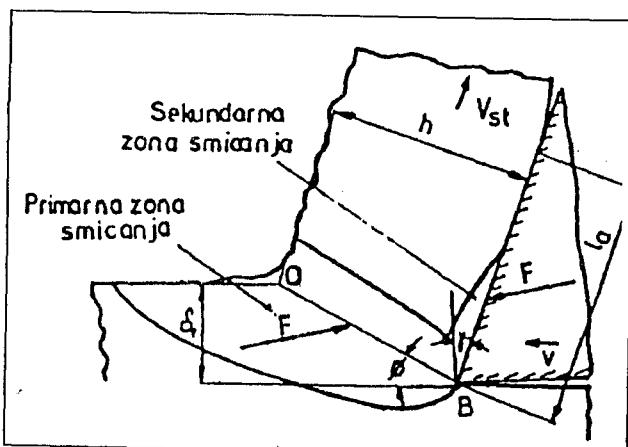
Opšti izgled zone rezanja prikazan je na slici 1. Usled dejstva reznog kлина silom F i relativnom brzinom v , duž kontaktne dužine l , na sloj materijala uslovjen dubinom rezanja d , javljaju se u zoni rezanja naponi. Kao posledica

naponu u zoni rezanja javljaju se zone primarne i sekundarne deformacije [1, 2, 3].

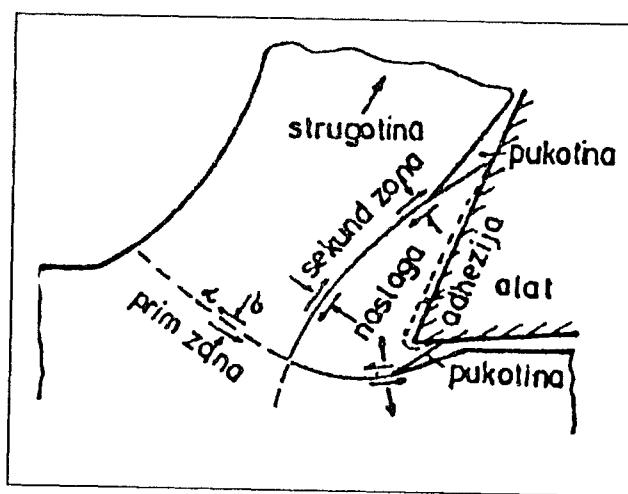
Uslovno, u zoni čiju granicu predstavlja duž OB završava se proces plastične deformacije smicanjem, te tako deformisana zrna nastavljaju kretanje brzinom v_{st} .

Na slici 2 prikazan model koji pokazuje da pri formiranju naslage mogu da nastanu prsline koje počinju na grudnoj i leđnoj površini alata. Prsline koje počinju ispod leđne površine imaju veliki uticaj na integritet obrađene površine.

Cilj ovog rada je da analizira uticaj procesa nastajanja strugotine i njegov uticaj na kvalitet obrađene površine.



Sl. 1. Zona deformacije bez formiranja naslage
Deformation zone without deposit formation
Зона деформирования без образования наростей



Sl. 2. Zona deformacije prilikom formiranja naslage
Deformation zone during the deposit formation
Зона деформирования с наростю смеси ржавчины

Kovač dr Pavel, vanr. prof.,
Šidanin dr Leposava, red. prof.,
Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo,
Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad.

2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Za dobijanje uzorka korena strugotine, koji će poslužiti za istraživanje, razvijena je posebna metoda brzog zaustavljanja procesa. To je metoda koja bazira na lomu dela obradka usled unutrašnjeg napona u materijalu uzrokovanih silama rezanja [3, 5]. U tom cilju, uzorci su pripremljeni tako da kad se postigne odgovarajući odnos između brzine rezanja, pomaka i debljine sloja materijala, dolazi do loma na delu gde se nalazi koren strugotine.

Pripremljeni su uzorci od vrste čelika koji imaju oznaku po JUS-u Č.1730 i Č.3990 čiji je hemijski sastav prikazan u tabeli 1.

Tabela 1. Hemijski sastav čelika primenjenih u eksperimentu.

Obradak	Hemijski sastav [%]							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Ni
Č.1730	0.65	0.22	0.12	0.029	0.014	-	-	-
Č.3990	0.16	0.05	1.18	0.27	0.01	0.167	0.38	0.10

U toku rezanja, režimi rezanja su bili konstantni. Pri obradi je korišćen držač sa izmenljivim pločicama od tvrdog metala oznake SPUN, kvaliteta P 25. Rezna geometrija je bila: grudni ugao -6° , leđni ugao 6° . Rezanje je bilo ortogonalno i vršeno je na univerzalnom strugu Galeb snage 6 kW, bez korišćenja sredstava za hlađenje i podmazivanje.

Morfologija i karakterizacija mikrostrukture u korenu strugotine ispitivana je svetlosnim mikroskopom tipa Leitz i skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM) tipa JSM 35 sa radnim naponom od 25 kV. Uzorci su pripremljeni konvencionalnom metalografskom tehnikom. Pri

ispitivanju na SEM-u, radi eliminiranja efekta nabijanja elektrona, uzorci su naparavani zlatom u vakuum-naparivaču JEE4B pri vakuumu od 1.33-25 510 mbar i jačini struje od 26 A.

3. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA I NJIHOVA ANALIZA

Analiza procesa nastajanja strugotine i obrazovanja površinskog sloja obradka praćena je na čelicima Č.1730 i Č.3990 u normalizovanom stanju.

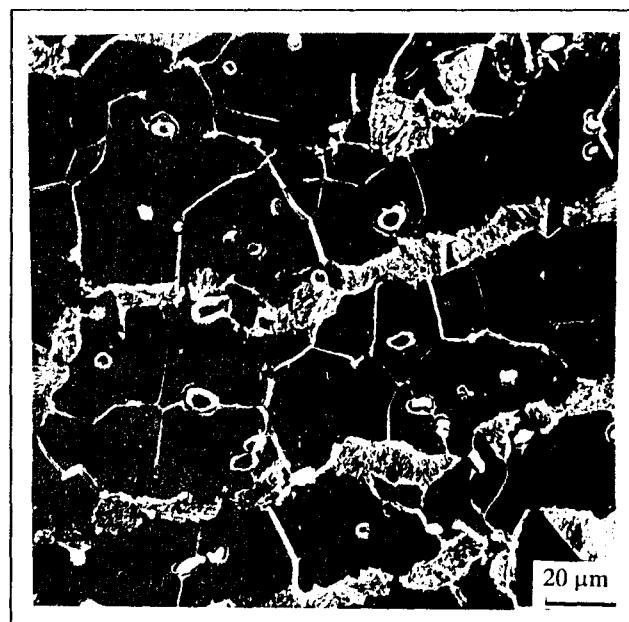
Čelik Č.1730 je ugljenični čelik sa 0.65%C, koji zbog procenta ugljenika, u mikrostrukturi sadrži veći procenat perlita od slobodnog ferita, što uslovjava veći udeo cementita (Fe₃C-karbidi železa). Pored perlita i slobodnog ferita prisutni su MnS nemetalni uključci u količini koja je dozvoljena za ovu vrstu čelika (po JK-skali ispod 3)-slika 3.

Čelik Č.3990 je legirani čelik sa Mn za automate, sa povećanim sadržajem S od 0.27%. Mikrostruktura se sastoji od slobodnog ferita, gnezda perlita i povećane količine nemetalnih uključaka MnS (po JK-skali iznad 5) - slika 4.

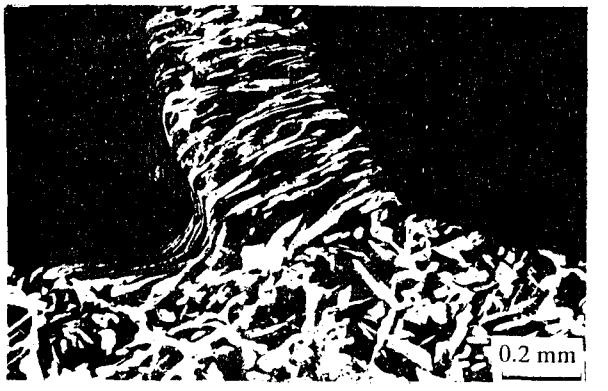
Treba naglasiti da na smicanju nestabilnost u zoni rezanja pored mikrostrukture metalne osnove, veliki uticaj imaju i nemetalni uključci MnS. Taj uticaj se pre svega svodi na to da nemetalni uključci smanjuju noseću površinu koja se opire smicanju, a možda je još važnije nastajanje koncentracije napona na graničnoj površini nemetalni uključak/metalna osnova čime su ispunjeni uslovi za stvaranje mikroprlina i mikrošupljina.



Sl. 3. Mikrostruktura Č.1730
Microstructure of steel Č 1730
Микроструктура стаљине Ст. 1730



Sl. 4. Mikrostruktura Č.3990
Microstructure of steel Č 3990
Микроструктура стаљине Ст. 3990



Sl. 5. Koren strugotine Č.1730
Root of the Č 1730 shaving
Корень стружки ис Ст. 1730



Sl. 6. Koren strugotine Č.3990
Root of the Č 3990 shaving
Корень стружки Ст. 3990

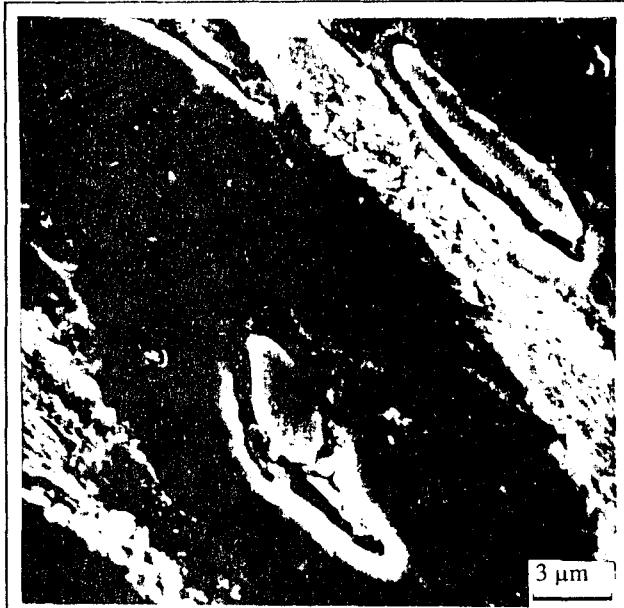
Izgled korena strugotine za Č.1730 prikazan je na slici 5, a za Č.3990 na slici 6. Kod Č.3990 uočava se veliki broj mikrošupljina i prslina u strugotini, oko ravni smicanja i u obrađenoj površini.

Ponašanje nemetalnih uključaka i metalne osnove pri različitim veličinama napona pokazuje da je u procesu rezanja prisutno nekoliko mehanizama nastajanja mikrošupljina i mikoprslina. Pri nižim naponima, mikrošupljine i mikoprsline se stvaraju na nemetalnim uključcima. U zavisnosti od oblika nemetalnih uključaka razlikuju se dva mehanizma nastajanja mikrošupljina:

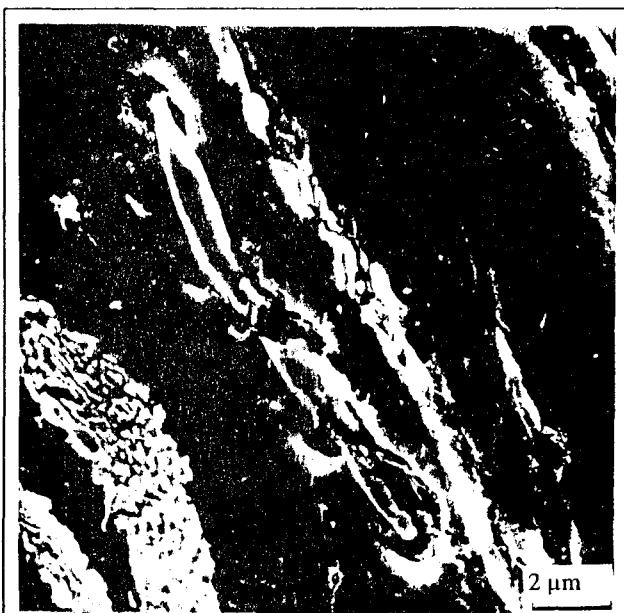
- mehanizam dekohezije granične površine nemetalni uključak/metalna osnova, koji se javlja kod okruglih uključaka, slika 7;
- mehanizam loma nemetalnih uključaka, mehanizam koji se javlja kod izduženih nemetalnih uključaka, slika 8.

Sa povećanjem napona iz mikrošupljina se dalje razvijaju mikoprsline čija koalescencija sa susednim mikrošupljnjima ili mikoprslinama dovodi do stvaranja krte i kratke, lako lomljive strugotine.

Kod izduženih nemetalnih uključaka, ovom procesu prehodi mehanizam dekohezije, odnosno stvaranja iz-



Sl. 7. Nastajanje mikrošupljine na sferičnom uključku
Formation of the micro void on the spherical inclusion
Образование микрораковины на сферическом включении

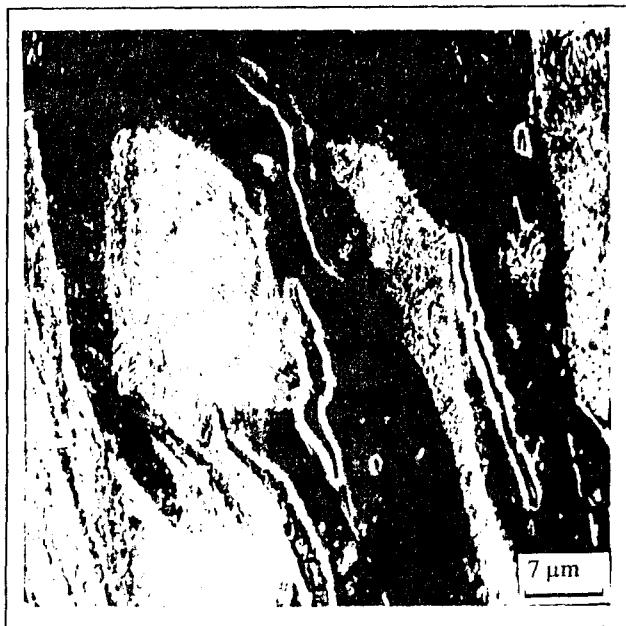


Sl. 8. Nastajanje mikrošupljine na izduženom uključku
Formation of the micro void on the elongated inclusion
Возникновение микрораковины на вытянутом

dužene mikrošupljine u kojoj su smešteni svi delovi slomljenog nemetalnog uključka.

U zoni rezanja gde je prisutan veliki stepen plastične deformacije (97%), mikoprsline nastaju i u metalnoj osnovi nezavisno od nemetalnih uključaka. Nastaju na graničnoj površini kolonije perlita/zrna ferita usled stvorenog gradijenta deformacije pošto se te mikrostrukture različito plastično deformatišu, slika 9.

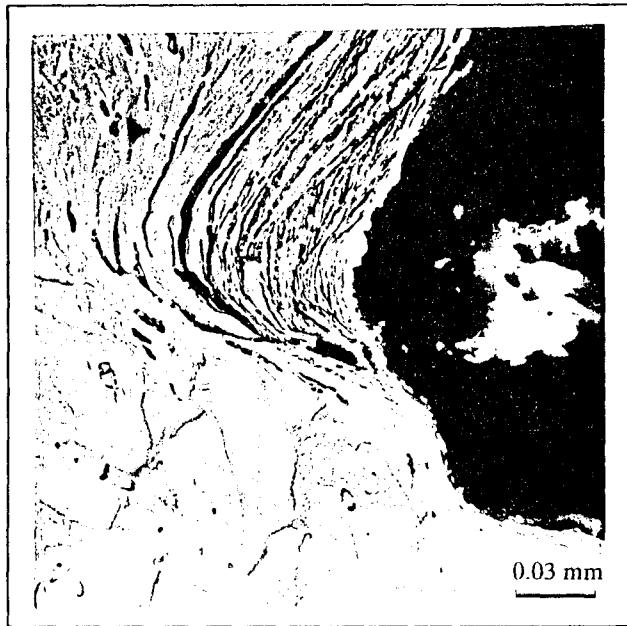
Pored stvaranja mikoprslina u primarnoj zoni smicanja, stvaraju se mikoprsline i u obrađenoj površini. Te prsline su uglavnom posledica dejstva zateznih napona, koji se



Sl. 9. Mikoprslina na graničnoj površini zrna
Micro crack on the grain boundary surface
Микротрецина на граничной поверхности зерна

generišu na graničnoj površini sekundarne zone smicanja. Sam proces rezanja materijala zapravo omogućava stvaranje zateznih napona u kontaktnoj površini ispod leđne površine alata i obrađene površine sa jedne strane i zateznih napona na graničnoj površini sekundarne zone smicanja u blizini kontakta grudne površine alata sa strugotinom, sa druge strane. Na taj način ustvari nastaju naslage.

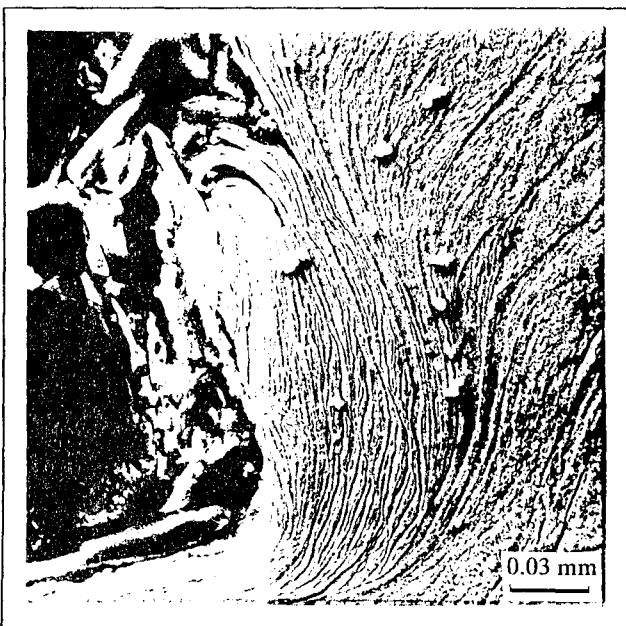
Identifikovane su : I) mikoprsline ispred vrha reznog klina, II) mikoprsline sa zadnje strane strugotine, III)



Sl. 11. Naslaga Č.3990
Deposit of Č 3990
Нароссы Сū. 3990

mikoprsline po preseku strugotine, IV) mikoprsline u obrađenoj površini.

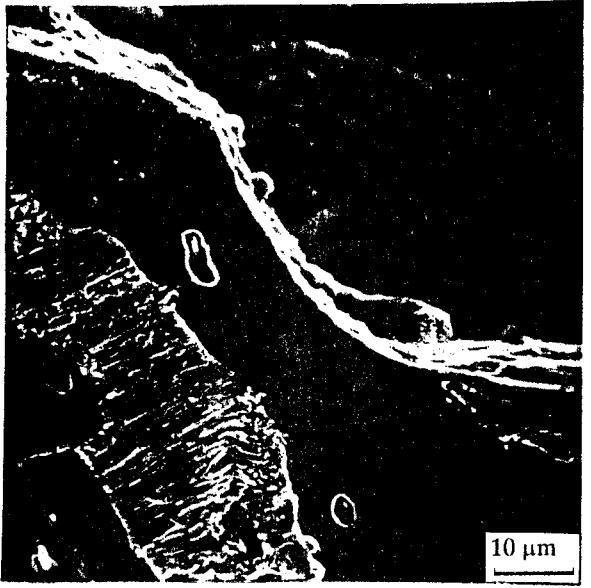
Slike 10 i 11, pokazuju da širenje mikoprslina ispred grudne i ispod leđne površine alata utiče na formiranje i odvajanje krupnih delova materijala veoma slično modelu, koji je prikazan na slici 2. Pored toga nastala naslaga može preuzeti ulogu sečiva i usled njenog periodičnog odvajanja u obrađenoj površini može se pojaviti udubljenje, čupanje materijala, prsline ili ispuštanje, kako se to vidi na slici 12 i 13.



Sl. 10. Naslaga Č.1730
Deposit of Č 1730
Нароссы Сū. 1730



Sl. 12. Obradena površina sa mikoprslinom u feritu Č.1730
Machined surface with the micro crack in ferrite Č 1730
Обработанная поверхность с микротрециной
в ферите Сū. 1730



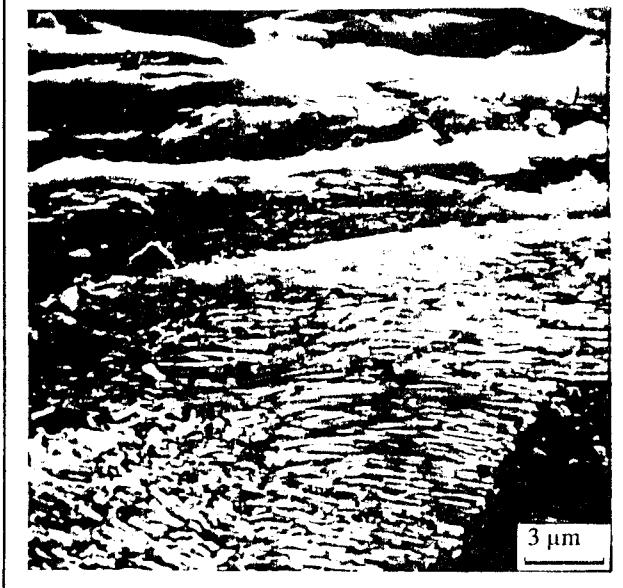
*Sl. 13. Obradena površina čupanje materijala Č.3990
Machined surface - material pulling out Č 3990
Обработанная поверхность - вырывание материала Ст. 3990*

Treba naglasiti da je ispod obrađene površine identifikovan deformisani sloj materijala debljine nekoliko desetina mikrona, slika 14. Debljina tog deformisanog sloja zavisi od režima rezanja a može da sadrži mikroprslne nastale na nemetalnim uključcima MnS ili u metalnoj osnovi, slika 15.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti:

- ▶ na obrađenoj površini može se uočiti deformisani sloj materijala u kome se nalaze mikroprslne;

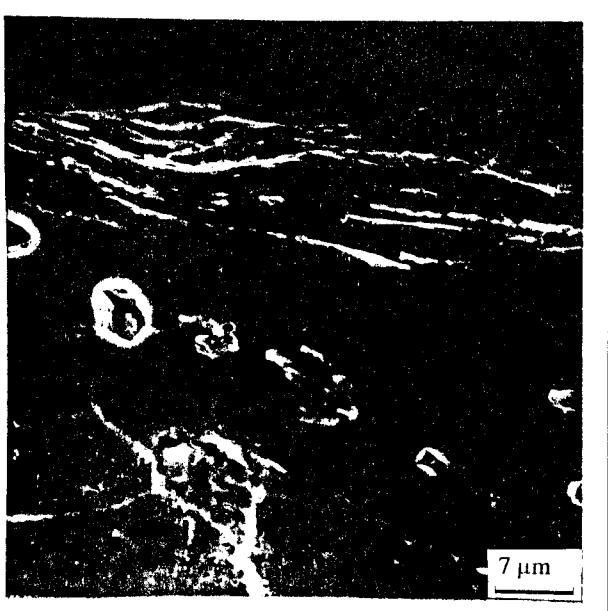


*Sl. 14. Obradena površina-deformisani sloj Č.1730
Machined surface - deformed layer Č 1730
Обработанная поверхность - деформированный слой стали 1730*

- ▶ na samoj obrađenoj površini se uočavaju tragovi odvojene naslage udubljenja i prsline kao posledica odvajanja naslage;
- ▶ u procesu nastajanja i lomljenja strugotine učestvuje kako metalna osnova tako i nemetalni uključci prisutni u materijalu;
- ▶ pri niskim naponima i deformacijama, mikroprslne nastaju na nemetalnim uključcima i to mehanizmom dekohezije ili mehanizmom loma nemetalnih uključaka;
- ▶ pri visokim naponima i deformacijama, mikroprslne nastaju na graničnoj površini kolonije perlita/zrna ferita, zbog različite sposobnosti plastičnog deformisanja i stvaranja gradijenta deformacije.

LITERATURA

- [1] BAO, H., STEVENSON, M., G.: Basic Mechanism for Built-up Edge Formation in Machining, Annals of the CIRP, Vol.25, 1, 1976.
- [2] BHAU-BRACAMONTE, J. L., WISE, M. L. H.: Austenitization of Steel During Chip Formation, Metallurgical Transactions A, Vol. 14A, 1983.
- [3] WISE, M., L., H., MILOVIĆ, R.: Ranges of Application of Free Cutting Steels and Recommended Tool Materials Science and Technology, Vol. 4, 1988, 933-943
- [4] BROWN,R. H., LUONG, H. S.: The Influence of Microstructure Discontinuities on Chip Formation, Annals of the CIRP, Vol. 25, 1, 1976.
- [5] SKAKUN, Ž.: Istraživanje procesa nastajanja strugotine pri obradi na strugu, Diplomski rad, FTN, IPM, Novi Sad, 1991.
- [6] KOVAC, P., ŠIĐANIN, L., MILIKIĆ, D.: Istraživanje procesa nastajanja strugotine pri obradi na strugu, Zbornik radova IPM, broj 9, Novi Sad, 1992, 95-104



*Sl. 15. Obradena površina sa prslinom i naslagom Č.3990
Machined surface with crack and layer Č 3990
Обработанная поверхность с трещиной и наростом Ст. 3990*

Influence of The Shavings Formation on The Machined Surface State

In analyses of the cutting process it has been assumed that a continuum approach may be adopted. This paper provides that the influence of discontinuities in the microstructure plays an important role in cutting. The methodology adopted was based on the metallurgical approach to metal cutting, i.e., to correlate material behavior during cutting with the underlying phenomena occurring during chip formation. The employment of a quick-stop device rapid enough to "freeze" the cutting action was essential for analyzing the micro structural changes that take place within the chip and surface integrity.

Влияние процесса стружкообразования на состояние обработанной поверхности

Анализ процесса резания основан на механике непрерывности. В работе показано, что отклонения в микроструктуре оказывают большое воздействие на процесс резания и состояние обработанной поверхности. Использованная в работе методика основывается на металлургическом подходе к резанию, поскольку целью исследователей было вскрытие соотношения между поведением материала при резании и металлургическими феноменами, являющимися при образовании стружки. Исследования проводили на установке для быстрого прекращения процесса резания как бы обеспечивающей мгновенный осмотр изменений, возникших в микроструктуре обработанной поверхности.

Jugoslovensko društvo za tribologiju pokreće

TRIBOLOŠKU KAMPANJU

*s očekivanjem da će te i Vi
u njoj učestvovati*

*Obratite pažnju na informaciju
na 28. strani ovog broja časopisa!*

B. NEDIĆ, V. V. KUZIN, R. JEČMENICA,
F. V. POPOV

Perspektive korišćenja reznih alata od silicijum nitridne keramike sa ciljem povećanja efektivnosti obradnih procesa

1. UVODNA RAZMATRANJA

Povećanje produktivnosti i efikasnosti savremene proizvodne opreme se nalazi i u racionalnijem korišćenju visokoproduktivnih i pouzdanih reznih alata. Značajno mesto u nizu novih reznih alata zauzimaju izmenljive višestrate rezne pločice od keramičkih materijala. Takvo mesto uslovljeno je mogućnošću intenziviranja procesa rezanja povećanjem brzine rezanja. Važnu ulogu u usavršavanju keramičkih alata doprinoje je izražen razvoj u oblasti metalokeramike. Sa druge strane, može se primetiti da keramički alati nisu našli široku primenu do sada i da je njihova zastupljenost oko 5% od ukupnog broja reznih alata.

Problem većeg korišćenja alata na bazi keramičkih materijala u uslovima automatizovanih procesa obrade, može biti rešen usavršavanjem novih vrsta keramičkih materijala na bazi silicijum nitrida. Visoka tvrdoća i otpornost (i na povišenim temperaturama), nizak koeficijent termičkog širenja, omogućavaju uspešno korišćenje reznih alata i pri gruboj obradi (u uslovima prekidne obrade i

obrade "kore" materijala) različitih vrsta sivog liva, kaljennih čelika (50-60 HRC), kao i pri obradi visoko legiranih čelika. Pri tome se obezbeđuje visoka postojanost alata u uslovima zadate tačnosti mera predmeta obrade i hravosti obrađene površine.

Cilj realizovanih ispitivanja, čiji su rezultati delom prikazani u radu, je bio izučavanje procesa koji se odvijaju u zoni rezanja, utvrđivanje zakonitosti habanja i određivanje postojanosti alata u uslovima obrade sivog liva, legiranih čelika i termički obrađenog čelika. Brojna ispitivanja su se odnosila na merenje i analizu: otpora rezanja, temperature rezanja i kvaliteta obrađene površine pri obradi različitih materijala. Pored ovih ispitivanja vršena su ispitivanja i u uslovima prekidne obrade struganjem kao i ispitivanja u uslovima super velikih brzina rezanja. Analiziran je uticaj geometrije alata na postojanost. Ispitivan je uticaj stanja površinskog sloja i uslova brušenja na kvalitet pločica. Radi iznalaženja mogućnosti poboljšanja reznih svojstava pločica vršene su različite obrade površinskih slojeva kao što su termička obrada i nanošenje prevlaka. Dobijeni rezultati treba da posluže za formiranje preporuka za efikasniju primenu ovih alata.

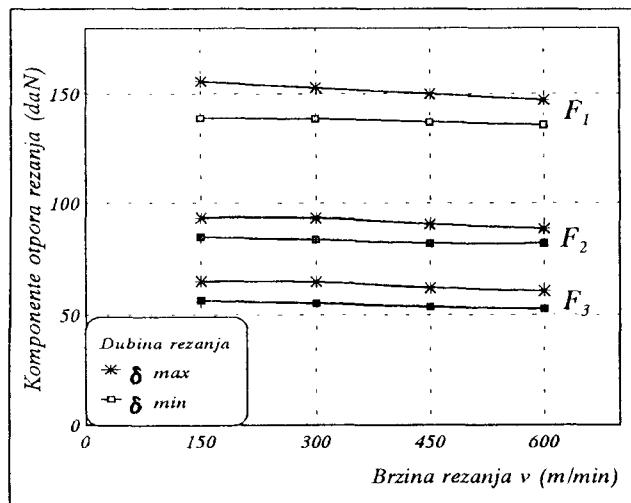
U radu su objedinjeni i sistematizovani rezultati ispitivanja dobijeni u Laboratoriji za obradu metala rezanjem na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu (rezultati označeni sa I) i u Institutu "Stankin" u Moskvi (rezultati označeni sa II).

Kuzin. V. V., Institut "STANKIN", Moskva
Popov V. F., Institut "STANKIN", Moskva
B. Nedić, Mašinski fakultet, Kragujevac
R. Ječmenica, Tehnički fakultet, Čačak

2. OTPORI REZANJA

U radu je prikazan deo dobijenih rezultata merenja otpora rezanja pri obradi struganjem različitih materijala predmeta obrade reznim pločicama kvadratnog oblika od silicijum nitridne keramike. Rezna geometrija je definisana korišćenim nosačima (PSDNR i PSGNR 2525 M12) i reznim pločicama SNMN 120812.

Dobijeni rezultati potvrđuju poznatu zavisnost komponenti otpora rezanja i parametara procesa obrade. Otpori rezanja se smanjuju sa povećanjem brzine rezanja do 600 m/min , pri čemu povećanje dubine rezanja ne utiče na promenu zavisnosti otpora i brzine rezanja, već na veličinu komponenti (slike 1 i 2). Povećanje tvrdoće materijala predmeta obrade od $HB 150$ do $HB 220$ uslovjava povećanje komponente otpora rezanja F_1 za 25% (slika 1 - II).

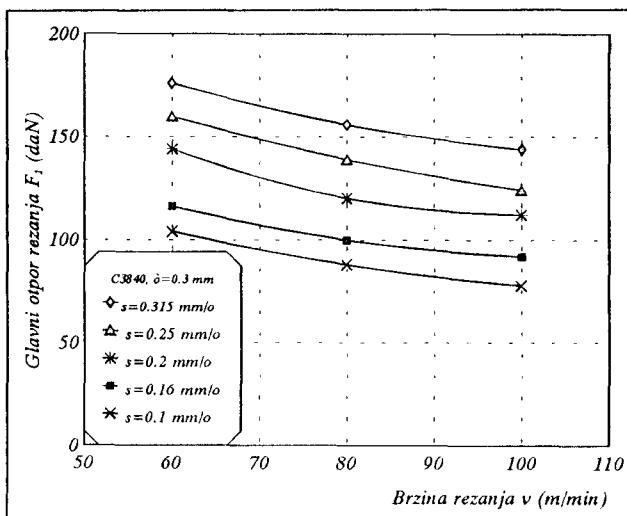


*Sl. 1. Uticaj brzine rezanja na komponente otpora rezanja pri struganju sivog liva SC-32
Influence of the cutting speed on the cutting forces components in turning of the gray cast iron SC-32
Влияние скорости резания на составляющие сопротивления резанию при точении серого СЧ-32*

Prilikom ispitivanja termički obrađenog čelika zapaženo je da sa povećanjem brzine rezanja dolazi do znatnog smanjenja glavnog otpora rezanja F_1 (slika 2 - I) i povećanja druge dve komponente rezanja F_2 i F_3 . To se može objasniti time da usled velike tvrdoće predmeta obrade dolazi do većih elastičnih deformacija predmeta obrade, smanjenja dubine rezanja što izaziva znatni porast sile prodiranja alata i nemogućnost odvijanja procesa rezanja na odgovarajući način.

Ispitivanja pri obradi sivog liva SL-26 (I) su imala za cilj analizu uticaja habanja alata na povećanje otpora rezanja. Pri ovome je utvrđeno da, na primer, pohabanost alata po leđnoj površini do 0.5 mm uzrokuje povećanje komponenti otpora rezanja čak i do 30%.

Pri obradi čelika Č.5422 sa dubinama rezanja iznad 0.3 mm merenje otpora rezanja je veoma otežano. Ra-



*Sl. 2. Promena otpora rezanja F_1 pri obradi termički obrađenog čelika Č.3840 (tvrdoće 60 HRC - I)
Variation of the cutting force F_1 in machining of the thermally treated steel C3840 (hardness 60 HRC) (I)
Изменение сопротивления резанию при обработке термически обработанной стали Ст.3840 (твердосыть 60 HRC) (I)*

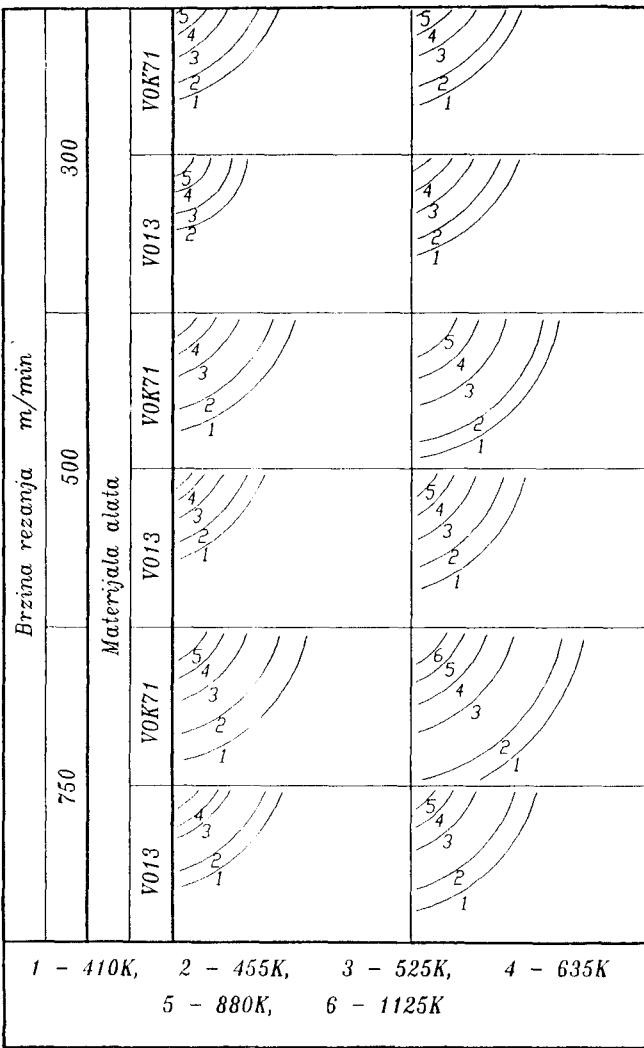
zlog za to su velike amplitude oscilovanja signala otpora rezanja usled velikih vibracija i nestabilnosti procesa obrade (I).

Promena komponente otpora rezanja F_1 pri obradi legure Inconel-718 sa povećanjem brzine rezanja je neuobičajena. Povećanje brzine rezanja sa 120 na 140 m/min (pri $s=0.3 \text{ mm/o}$, $\delta=1.5 \text{ mm}$) dovodi do povećanja komponente F_1 za 5-10%. Dalje povećanje brzine rezanja čak i pri smanjenju koraka na $s=0.2 \text{ mm/o}$ izaziva takođe rast ove komponente za 10-15% (II).

3. TEMPERATURA REZANJA

Toplotno stanje reznog alata je ispitivano uz primenu višepozicionih termoindikatorskih davača tipa THI-53 [3]. To je omogućilo da se dobije kompleksna slika toplotnog stanja alata definisanog temperaturnim poljem na površinama reznog klina alata. Za realizaciju ove metode merenja korišćeni su isti nosači pločice kao kod prethodnog ispitivanja. Na jednoj od reznih površina pločice brušenjem su formirani žlebovi dubine 0.1 do 0.15 mm , u koje su postavljeni termoindikatorski davači. Ispitivanje je vršeno kontinualnim struganjem sivog liva SC-32 u širokom dijapazonu režima obrade: $v=200-800 \text{ m/min}$, $s=0.075-0.7 \text{ mm/o}$, $\delta=2.0 \text{ mm} = const$. Posle obrade rezanjem od 30 sekundi toplotno stanje reznog alata je karakterisano serijom izotermi, u vidu različito obojenih površina (slika 3 - II).

Analiza dobijenih rezultata omogućava da se izvede više zaključaka. Raspored izotermi sa maksimalnim temperaturama kod pločica od tvrdog metal VK6+TiC GT i keramike Si₃N₄ je približno jednak zbog identičnih procesa koji se odvijaju između alata i strugotine. Međutim,



1 - 410K, 2 - 455K, 3 - 525K, 4 - 635K
5 - 880K, 6 - 1125K

Sl. 3. Raspored izotermi kod različitih materijala pri struganju sivog liva SC-32 (HB220) (II)
Distribution of the isotherms for different materials in turning the gray cast iron SC-32 (HB220) (II)
Распределение изотерм различных материалов при точении серого чугуна СЧ-32 (HB 220) (II)

zbog veće toplotne provodnosti tvrdog metala u odnosu na silicijum nitridnu keramiku, uočene su veće vrednosti temperatura kod tvrdog metala, što potvrđuje i raspored izotermi sa vrednostima temperatura 410K i 455K.

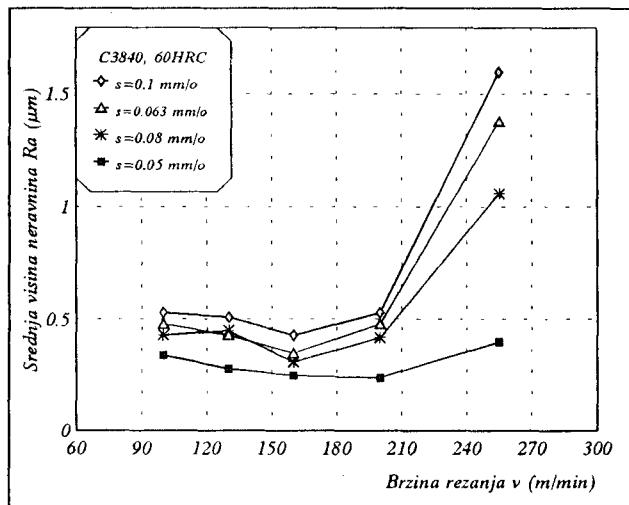
Sa povećanjem vremena rezanja kod alata od silicijum nitridne keramike povećava se deo toplote koji odlazi na leđnu površinu alata, tako da se intenzitet izvora toplote na grudnoj površini ne menja. Ovako izvršena analiza pokazuje, da toplotno stanje alata od silicijum nitridne keramike pri obradi sivog liva u opštem slučaju ne predstavlja ograničavajući faktor za njegovu primenu.

4. KVALITET OBRAĐENE POVRŠINE

Ispitivanja kvaliteta obrađene površine su pokazala da brzina rezanja u rasponu od 200 do 320 m/min ne utiče bitno na kvalitet obrađene površine pri obradi sivog liva. Pri obavljenim ispitivanjima zapaženo je da sa habanjem

alata u početnom periodu dolazi do smanjenja visinskih parametara hrapavosti, da bi sa daljim povećanjem habanja došlo do znatnog pogoršanja kvaliteta obrađene površine.

Ispitivanja obrade termički obrađenog čelika Č.3840, tvrdoće 60 HRC, u oblasti režima fine završne obrade struganjem, su pokazala da se ovim postupkom obrade mogu ostvariti kvaliteti obrađene površine identični onim koji se dobijaju pri obradi brušenjem (slika 4 - I).



Sl. 4. Kvalitet obrađene površine pri obradi termički obrađenog čelika C. 3840
Machined surface quality in machining the thermally treated steel C3840
Качесиво обработанной поверхности при обработке термически подогретой сталью C3840

5. HABANJE ALATA

Kvalitet rezognog alata je određen pre svega njegovom postojanošću, koja zavisi od sposobnosti kontaktnih površina alata da se suprostave procesima habanja i krzanja, koji nastaju kao rezultat uzajamnog dejstva alata i materijala predmeta obrade u zoni rezanja.

U zavisnosti od uslova rezanja intenzitet habanja alata je različit. U vezi s tim, u radu se razmatraju pitanja vezana za postojanost rezognog alata od silicijum nitridne keramike kao i mogućnost primene u standardnim uslovima (ISO - P, K, M). Formiranje krivih habanja i utvrđivanje razloga otkaza alata usled krzanja treba da omogući iznalaženje puteva za usavršavanje ovog alatnog materijala.

5.1. Habanje alata pri obradi sivog liva

Rezna keramika, kao što su ispitivanja potvrdila, prvenstveno je našla primenu kod obrade sivog liva. Pri obradi visoko kvalitetnog liva, na kome je prethodno izvršena obrada rezanjem i skinuta "kora", najefikasnija je primena keramike na bazi aluminijum-oksida zbog visoke otpornosti alata na habanje po leđnoj površini. Kod grube

obrade predmeta koji na površini imaju "koru" i neravnomerni dodatak za obradu, ili pri glodanju sivog liva, keramički alati su do skoro bili neefikasni zbog nedovoljne čvrstoće. Pojava rezne keramike na bazi silicijum nitrida je omogućila da se znatno proširi oblast efikasne primene keramičkih alata.

Kod fine obrade predmeta obrade od sivog liva SC-32 sa korakom koji ne prelazi 0.3 mm/o i brzinom rezanja $500 - 1000 \text{ m/min}$ rezni alat od silicijum nitridne keramike gubi reznu sposobnost usled habanja po leđnoj površini. Pri tome praktično neima pojave kratera na grudnoj površini alata. U nekim slučajevima, (pri $v=800 \text{ m/min}$) usled stvaranja naslage, na grudnoj površini mogu čak odsustvovati tragovi kontaktног dejstva sa materijalom predmeta obrade. Sa povećanjem vrednosti koraka do 0.5 mm/o i smanjenjem brzine rezanja dolazi do smanjenja intenziteta habanja po leđnoj površini i istovremeno počinje habanje po grudnoj površini u vidu kratera. Dalje povećanje koraka dovodi do pojave mikro pukotina u neposrednoj blizini reznog sečiva. Međutim, pojava mreže mikro pukotina i mikro krzanja ima lokalni karakter i ne izaziva brzi otkaz alata, ali njegov vek se znatno smanjuje (slika 5 - II).

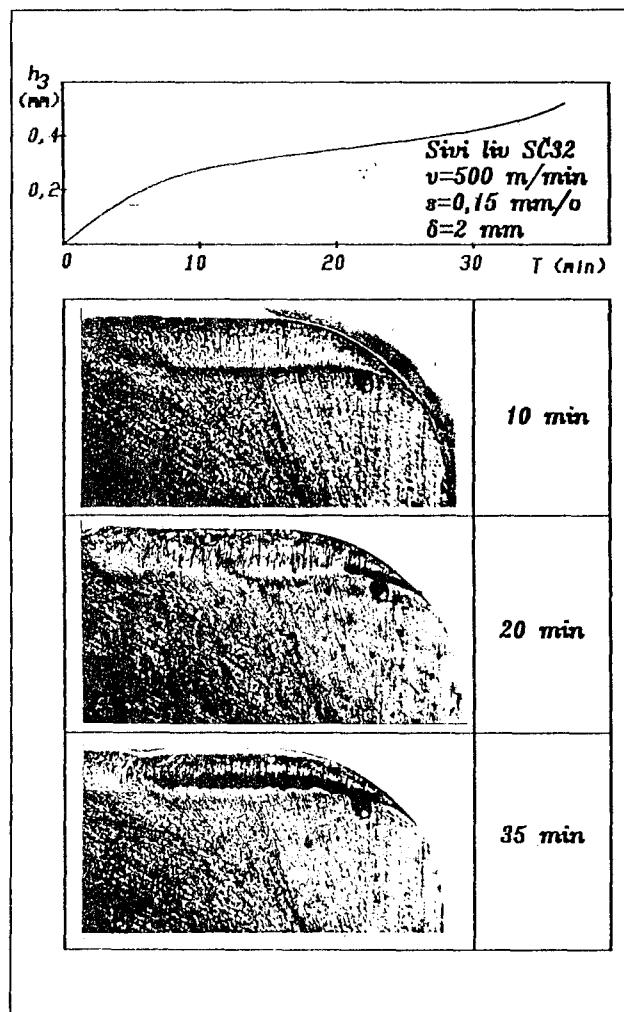
Neophodno je primetiti da u uslovima povećanog termohemijskog naprezanja reznog dela alata dolazi do plastične deformacije i promene oblika reznog klinja. Mehanizam puža-nja vruće presowane nitridne keramike je uslovljen krzanjem pojedinih zrna u odnosu na druga sa obrazovanjem pora na spojnim tačkama zrna, dimenzija $0.5-1.0 \text{ mikron}$. Pri tome se brzina širenja tih pora duž granice zrna određuje viskoznošću faza primesa.

Na slici 6 (I), prikazane su krive habanja dobijene pri obradi SL-26 u različitim uslovima obrade.

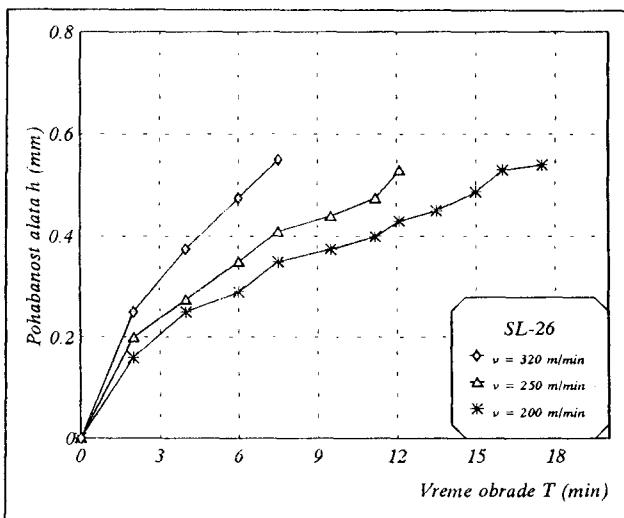
5.2 Habanje alata pri obradi čelika

Ispitivanje karaktera habanja reznih alata od silicijum nitridne keramike je vršeno pri struganju čelika 40X (HB220) u širokom dijapazonu režima rezanja (sl. 7-II). Analiza dobijenih rezultata pokazuje da dolazi do intenzivnog formiranja kratera po grudnoj površini već u početnoj fazi habanja alata. Pri tome se formira prelazna površ na grudnoj površini, koja predstavlja svojevrsnu granicu između kratera na grudnoj i habanja po leđnoj površini alata. Na ivicama kratera gde je najjače izražen hemijsko-oksidacioni oblik habanja, javlja se pohabani deo u vidu žlebova koji se protežu ka vrhi alata.

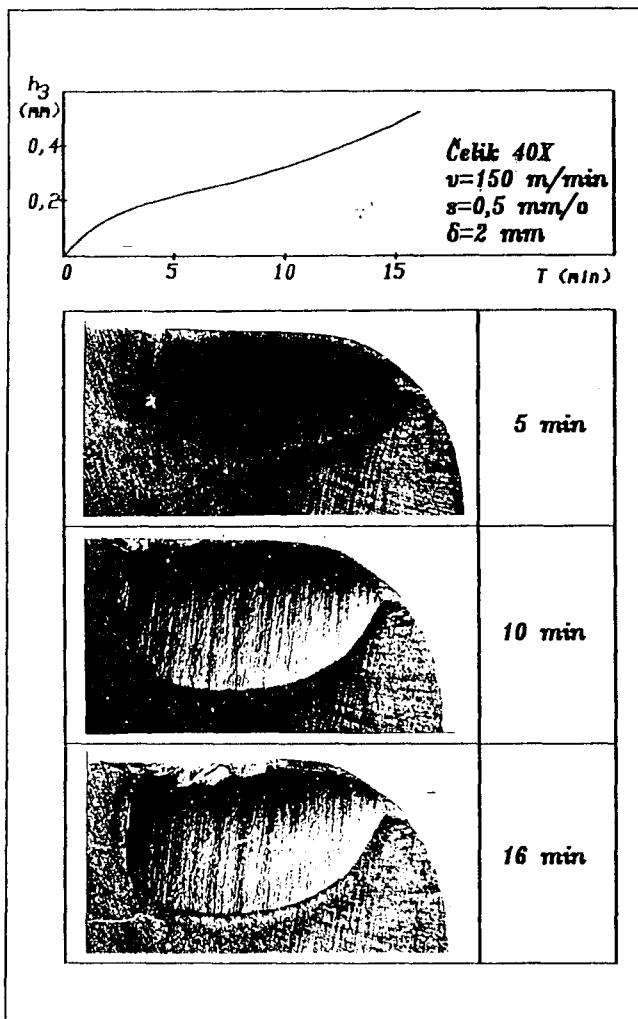
Na leđnoj površini alata već posle nekoliko sekundi rezanja formira se pohabana površina koja dostiže vrednost $h_3 = 0.05-0.15 \text{ mm}$ (u zavisnosti od režima rezanja). Daljom obradom rast habanja se znatno smanjuje, što je očigledno, povezano sa usporenim mikrorazaranjem površinskih slojeva keramičkog materijala. Kod veoma visokih opterećenja reznog dela alata, što je karakteri-



Sl. 5. Habanje rezne pločice pri obradi sivog liva (II)
Wear of the cutting platelet in machining
the gray cast iron (II)
Изнашивание режущей пластины при
обработке серого чугуна (II)



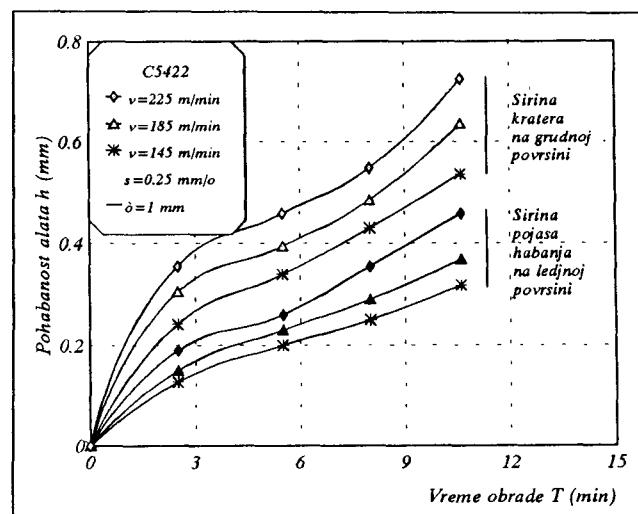
Sl. 6. Krive habanja alata pri obradi SL 26 (I)
Wear curves of tool in machining the gray
cast iron SL 26 (I)
Кривые износа инструмента при
обработке серого чугуна СЛ 26 (I)



Sl. 7. Habanje pločice od silicijum nitridne keramike pri obradi čelika (II)
Wear of the cutting platelet made of silicon nitride ceramics in machining of steel (II)
Изнашивание режущей пластиинки из кремнисто-нийридной керамики при обработке сталью (II)

stično pri obradi struganjem konstruktivnih čelika pri velikom koraku $s=0.5 \text{ mm/o}$, krater postaje sve izraženiji. Pri tome se zapaža njegov znatan porast u smeru od rezne ivice. Habanje po leđnoj površini povećava se relativno sporo i u većini slučajeva ne premašuje veličinu habanja po grudnoj površini. Izuzetak predstavlja gruba obrada predmeta obrade od konstruktivnih čelika sa neravnomernim dodatkom za obradu, prilikom koje se intenzivno razvija habanje u obliku žlebova po leđnoj površini. Mikro pukotine, koje se javljaju na reznom delu alata, predstavljaju lokalna mesta za dalji razvoj habanja alata. Porast mikropukotina, usmerenih, uglavnom, paralelno sa glavnom reznom ivicom, njihovo spajanje u veće mikro pukotine, kao i obrazovanje mreže mikropukotina, dovodi do krzanja reznog dela alata, što prouzrokuje otkaz alata (II).

Slični rezultati merenja habanja su dobijeni i pri obradi struganjem čelika Č.5422 u uslovima grube obrade. Na slici 8 (I), prikazane su dobijene krive habanja po grudnoj

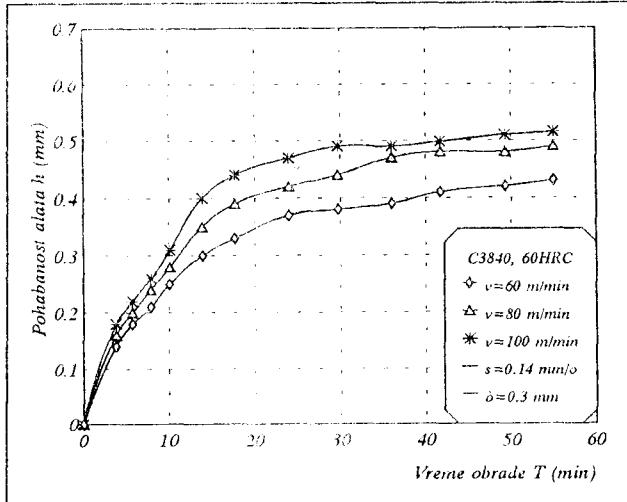


Sl. 8. Krive habanja alata po leđnoj površini pri obradi Č. 5422 (I)
Wear curves of tool wear on the back surface in machining of steel Č.5422 (I)
Кривые изнашивания затылочной поверхности инструмента при обработке Ст. 5422 (I)

i leđnoj površini. Pri korišćenju alata u uslovima fine obrade konstruktivnih čelika mehanizam habanja je nešto drugačiji. Relativno niska termo-mehanička opterećenost reznog dela alata ne dovodi do stvaranja mikro pukotina u alatnom materijalu. Pri tome krater na grudnoj površini, i ako se obrazuje, ne izaziva otkaz alata. Otkaz alata u ovom slučaju nastaje usled habanja po leđnoj površini alata u obliku ravnomerno pohabane površine, bez jasno izraženih vrhova ili žlebova. Odsustvo lokalnih mesta habanja na krajevima kontakta alata i predmeta obrade, pozitivno utiče na postojanost alata, jer u tom slučaju, ne postoje dodatni izvori trenja i distribucije toplote.

Sprovedena ispitivanja alata od silicijum nitridne keramike su pokazala da primena ovih alata pri obradi konstruktivnih čelika nije efikasna zbog male postojanosti, odnosno, visokog intenziteta habanja. Korišćenje različitih metoda usavršavanja keramičkih materijala treba da omogući povećanje postojanosti alata a time i primenu istih pri obradi čelika.

U uslovima završne obrade termički obradenog čelika tvrdoće 60 HRC alat se haba i po grudnoj i leđnoj površini. Kod obrade sa malom dubinom rezanja (0.3 mm) habanje se odvija po leđnoj površini pri čemu širina pojasa habanja po leđnoj površini relativno brzo dostiže vrednost 0.3 mm i ne menja se do otkaza alata. Pored pojasa habanja zapaža se pojava žleba na mestu završetka kontakta alata i predmeta obrade, koji sa vremenom obrade raste i predstavlja parametar zbog kojeg dolazi do otkaza alata. Na slici 9 (I), prikazane su krive habanja na osnovu ovog parametra. Pri relativno većoj dubini rezanja (0.6 mm) izraženo je habanje alata u vidu kratera. Može se uočiti da ne postoji velika razlika između oblika krivih habanja za dubine rezanja 0.3 i 0.6 mm .



Sl. 9. Krive habanja pri obradi termički obradenog čelika (I)
Wear curves in machining the thermally treated steel (I)
Кривые изнашивания при обработке термически
подогревленной (обработанной) стали (I)

U prvom periodu rezanja krive habanja imaju veliki intenzitet rasta, da bi posle dostizanja širine pojasa habanja od 0.3 do 0.4 mm nastupilo ustaljeno habanje sa veoma malim intenzitetom rasta.

6. ISPITIVANJE U USLOVIMA PREKIDNOG STRUGANJA

Radi efikasne primene reznog alata od silicijum nitridne keramike u uslovima obrade prekidnim struganjem i glodanjem sivog liva potrebno je raspolagati odgovarajućim podacima o postojanosti alata u različitim uslovima obrade.

Sprovedena ispitivanja su vršeni na polufabrikatima od sivog liva specijalnog oblika, koji obezbeđuju različite odnose vremena radnog i praznog hoda, u sledećem režimu: $v=400$ m/min, $s=0.4$ mm/o, $\delta=1.0$ mm. Analiza dobijenih podataka pokazuje da prekidna obrada struganjem pri obradi sivog liva ne utiče bitno na eksploatacijske karakteristike reznog alata (II).

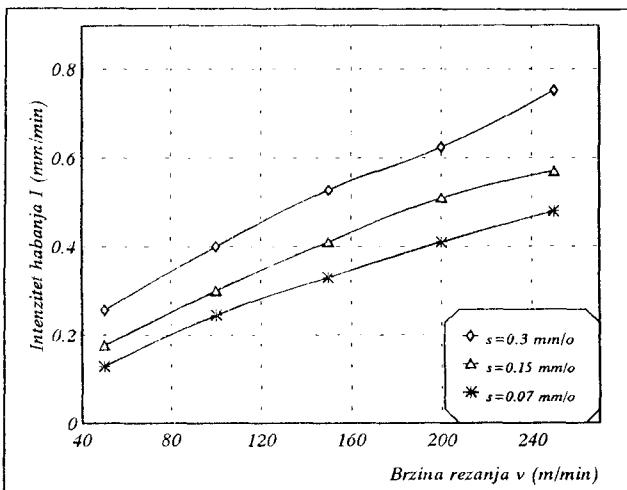
Tako, na primer, srednja postojanost rezne pločice od silicijum nitridne keramike pri neprekidnom struganju pod navedenim režimima iznosi $T=14.6$ min, pri obradi polufabrikata sa jednim prekidom (kanalom) $T=12.4$ min, dok je sa četiri prekida postojanost $T=17.5$ min. Ispitivanje habanja reznih pločica pri prekidnom struganju je pokazalo da postoje krateri i mikropukotine na reznom klinu, međutim ti defekti, ne utiču znatno na postojanost alata. Smanjenje postojanosti alata pri struganju sivog liva sa jednim prekidom je vezano, verovatno, za povećanje nivoa uklarnih opterećenja, izazvanih neuravnoteženošću masa pri obrtanju takvog predmeta obrade.

7. OBRADA LEGURE NA BAZI NIKLA

Kako je ranije pokazano, rezni alat sa silicijum nitridnom keramikom se može koristiti i pri obradi visokolegiranih čelika. Radi potvrde ove konstatacije izvršena su odgovarajuća ispitivanja pri obradi struganjem legure nikla XH77TP (II). Eksperimenti su ostvareni uz korišćenje SHP u širokom dijapazonu režima obrade: $v=50-300$ m/min, $s=0.07-0.3$ mm/o, $\delta=0.5-1.5$ mm. Za merenje habanja korišćeni su optičko-mehanički mikroskop BMh - 2C, MIR-4 i mikroskop pomoću rastela MINI-SEM. Alat je smatrana pohabanim ako je jedan od analiziranih parametara postigao određenu vrednost i to: širina pojasa habanja po lednoj površini $h_3=0.5$ mm, veličina žleba habanja po lednoj površini $h_1=1.5$ mm. Pri ispitivanjima korišćene su različite vrste keramičkih pločica na bazi silicijum nitrida.

Analiza dobijenih rezultata (slika 10) je pokazala, da se sa povećanjem brzine rezanja povećava intenzitet habanja reznog alata od silicijum nitridne keramike. Tako, na primer, pri struganju sa korakom u dijapazonu $s=0.07-0.15$ mm/o, dubinom rezanja $\delta=1.0$ mm i brzinom rezanja $v=150$ m/min, postojanost reznih pločica iznosi u proseku 3-4 min. Povećanje brzine rezanja do 200 m/min dovodi do smanjenja postojanosti alata na 1.5 min, a pri daljem povećanju brzine rezanja postojanost se smanjuje na samo 30 sec.

Visoka nestabilnost procesa rezanja legure nikla uslovljava složen oblik habanja i krzanja alata od silicijum nitrida. Najintenzivnije se habaju i krzaju periferni delovi kontaktnih površina. Preovladava habanje u vidu žlebova što u znatnoj meri ograničava reznu sposobnost alata.



Sl. 10. Zavisnost habanja alata od silicijum nitridne keramike pri struganju legure XH77TP po režimu rezanja (II)
Dependence of the tool wear intensity for the tool made of silicon nitride ceramics in turning the alloy XH77TP on the cutting regime (II)
Зависимость интенсивности изнашивания
инструментов из кремнистого-нитридной
керамики при точении силава XH77TP
по режиму резания (II)

Kritična vrednost habanja (u ovom slučaju je to dužina žlebova) je $hk=1.5\text{--}2.5\text{ mm}$. Dalji rast žlebova dovodi do makro krzanja rezne pločice po mehanizmu rasklinjavanja. Ulogu svojevrsnog kлина predstavlja materijal predmeta obrade, koji se nalazi u zoni rezanja u viskozno-tečnom stanju. Pored habanja po leđnoj površini otakaz alata, pri obradi visoko legiranih čelika, može nastati i usled krzanja po grudnoj površini. Prilikom obrade sa korakom većim od 0.3 mm/o povećava se verovatnoća otkaza alata zbog ovog viđa habanja.

8. UTICAJ GEOMETRIJE ALATA NA POSTOJANOST

Postojanost alata u znatnoj meri zavisi od geometrijskih parametara reznog dela. Kako praksa pokazuje, na postojanost bitno utiču vrednosti uglova reznog kлина, radius vrha i geometrija zakošenja na grudnoj površini.

Radi ispitivanja uticaja geometrijskih parametara na postojanost reznog alata pri struganju sivog liva SČ-32 izvršena je serija ispitivanja u uslovima polufinog struganja ($v=500\text{ m/min}$, $s=0.15\text{ mm/o}$, $\delta=1\text{ mm}$) i grubog struganja ($v=500\text{ m/min}$, $s=0.5\text{ mm/o}$, $\delta=1\text{ mm}$) (II).

Iz dobijenih rezultata može se zaključiti, da je optimalna vrednost grudnog ugla -7° . Povećanje grudnog ugla do $+7^\circ$ dovodi do povećanja mogućnosti otkaza alata zbog krtog loma i krzanja reznog dela. Povećanje radijusa vrha od 0.8 do 2.4 mm uslovjava porast dužine kontakta između reznog kлина i materijala predmeta obrade, što dovodi do povećanja otpora rezanja. To se negativno odražava na tačnost obrade. S druge strane, povećanje radijusa vrha utiče na povećanje čvrstoće reznog dela. Zbog toga je za finu obradu optimalni radius vrha $r=0.8\text{ mm}$, za polufinu $r=1.2\text{ mm}$, dok za grubu obradu $r=2.4\text{ mm}$.

Uticaj radijusa vrha na habanje alata od silicijum nitridne keramike pri obradi visokolegiranih čelika ima složeni karakter. Povećanje radijusa vrha utiče na smanjenje intenziteta obrazovanja žlebova na leđnoj površini, koji predstavljaju parametar zbog koga dolazi do otkaza alata. Na primer, povećanje radijusa vrha od $r=1.2$ do $r=3.5\text{ mm}$ dovodi do smanjenja intenziteta habanja alata za 1.5 do 2 puta .

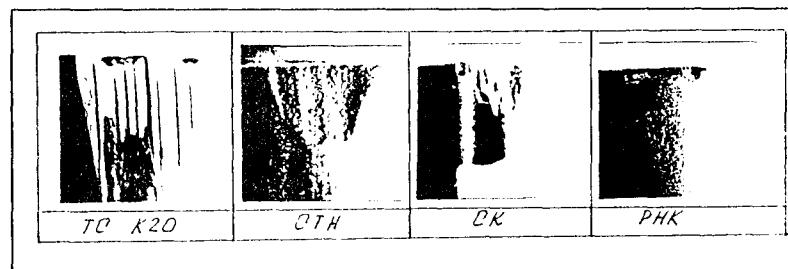
Uticaj parametara zakošenja grudne površine reznog dela alata na postojanost, određen je vrednošću koraka rezanja. U oblasti malih koraka ($s=0.075\text{ mm/o}$) zakošenje grudne površine alata ne utiče pozitivno na postojanost alata. To je, očigledno, povezano sa nepovoljnim kontaktnim procesima na delu ojačane grudne površine. Sa povećanjem koraka do 0.3 mm/o uloga zakošenja grudne površine raste, pri čemu je pri vrednosti veličine

zakošenja od $(0.2\text{--}0.3)\text{ mm}$ postojanost alata maksimalna. Dalje povećanje tog parametra je necelishodno, jer se postojanost alata smanjuje (II).

9. ISPITIVANJA PRI VISOKIM I SUPERVISOKIM BRZINAMA REZANJA

Danas su veoma aktuelna ispitivanja pri visokim i supervisokim brzinama rezanja. U okviru rada prikazan je deo rezultata ispitivanja i to pri obradi čeonim glodanjem (II). Kao rezni alat korišćeno je glodal sa dve mehanički pričvršćene pločice, od kojih jedna vrši obradu rezanjem a druga je namenjena za uravnoteženje alata. Ispitivane su rezne pločice od različitih keramičkih materijala.

Ovim ispitivanjima utvrđen je uticaj režima rezanja na intenzitet habanja alata. Pri obradi čelika, povećanje brzine rezanja sa 30 m/s na 80 m/s , dovodi do povećanja intenziteta habanja za $2\text{--}3\text{ puta}$. Pri tome rast ima približno linearni karakter. Povećanje dubine rezanja od 0.2 do 1 mm , kao i koraka, dovodi takođe do linearnog rasta intenziteta habanja.



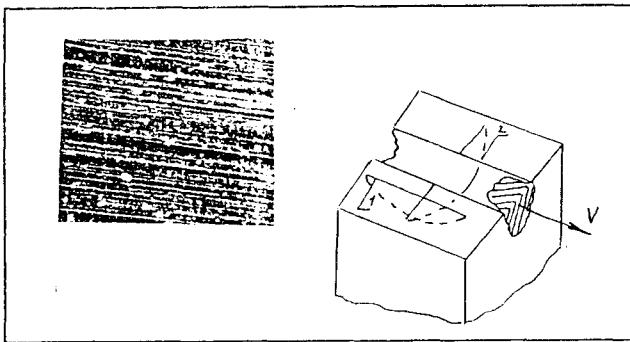
Sl. 11. Habanje reznih pločica pri super velikim brzinama
Wear of the cutting platelets at super high cutting speeds
Износ режујућих пластиника при сверхвысоких скоростях резания

Za razliku od obrade čelika, intenzitet habanja pri obradi sivog liva ovim alatima u vrlo maloj meri zavisi od brzine rezanja, koraka i dubine u toku prvih 20 minuta obrade. Upoređenjem intenziteta habanja ispitivanih pločica može se zaključiti da se najbolji rezultate pri obradi postižu sa reznim pločicama od silicijum nitridne keramike, a najslabiji sa alatom od oksidne keramike (slika 11 - II).

10. ISPITIVANJE POVRŠINSKOG SLOJA PLOČICA

Kod keramičkih alata oštećenje površinskog sloja usled neadekvatnih režima obrade brušenjem, je osnovni razlog za smanjenje postojanosti, a defekti nastali pri toj obradi, su izvori mikro i makro krzanja reznog dela. Ovakvo oštećenje površinskog sloja alata, šematski predstavljeno na slici 12 (II), izaziva istovremeno i smanjenje čvrstoće alata.

Realizovana ispitivanja sa uzorcima od silicijum nitridne keramike, obrađenih na ravnoj brusilici u širokom dija-

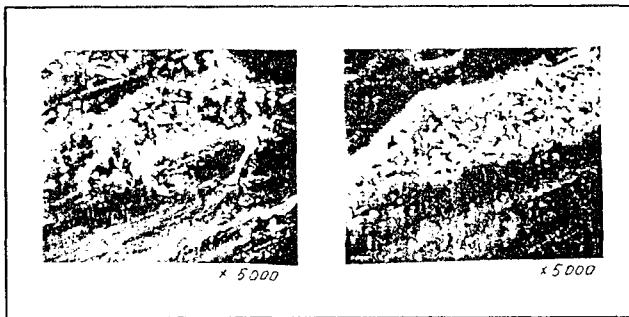


Sl. 12. Površinski sloj alata dobijen pri neadekvatnoj obradi brušenjem 1 - uzdužna pukotina, 2 - poprečna pukotina (II)
Surface layer of the tool obtained with the inadequate machining by grinding 1 - longitudinal crack, 2 - lateral crack (II)
Поверхностный слой инструмента, полученный при несоответствующей обработке шлифованием
1 - продольная трещина, 2 - поперечная трещина (II)

pazonu režima brušenja, su imala za cilj utvrđivanje uticaja uslova brušenja na kvalitet površinskog sloja pločice. Korišćeni su uzorci dimenzija $6 \times 6 \times 40$ mm, koji su brušeni do veličine $4.5 \times 4.5 \times 40$ mm, u režimima koji nisu omogućili stvaranja zaostalih unutrašnjih napona. Pri tome je dobijena mala hrapavost, a tvrdoća uzorka se nije menjala. Ispitivanje savojne čvrstoće uzorka od silicijum nitridne keramike vršeno je na mašini tipa INSTRON. Kvalitet i defekti na površinskom sloju ispitivani su pomoću optičkog (MMR-4) i elektroškanirajućeg (MINI-SEM) mikroskopa.

Utvrđeno je, da povećanje dubine brušenja i radikalnog koraka dovodi do naglog smanjenja čvrstoće uzorka. Smanjenje čvrstoće je u direktnoj zavisnosti od kvaliteta brusne ploče. Na primer, pri brušenju brusnom pločom ASR 200/160 BI-100 pri $v=25$ m/s, $vp=15$ m/min, $sr=1$ mm/dv.hod, $\delta=0.03$ mm, prosečna čvrstoća uzorka iznosila je 330-350 MPa. Korišćenjem brusnih ploča sa granulacijom 160/125 μm dobija se veća čvrstoća 340-350 MPa, a u slučaju granulacije 125/100 μm čvrstina uzorka ima još veću vrednost (380-400 MPa).

Proučavanje morfologije obrađene površine uzorka od silicijum nitridne keramike na elektronsko-skenirajućem mikroskopu je pokazalo postojanje defekata, koji nastaju pri brušenju. Pre svega to su haotično raspoređeni pojedini krateri dužine od 3 do 40 μm , brazde oštećenog materijala duž pravca brušenja i pojedinačne pukotine (slika 13 - II). Krateri imaju eliptičan oblik sa velikom osom, orijentisanim duž pravca brušenja uzorka. Dubina kratera je u opštem slučaju neznatna i iznosi do 3 μm . Pukotine, koje se formiraju na površini uzorka, šire se normalno na pravac brušenja i imaju oblik polumeseca (slika 13). Krateri i pukotine koji nastaju u površinskom sloju su posledica relaksacije napona u lokalnim zonama maksimalnih elastičnih napona. Utvrđeno je da je količina kratera, brazda i pukotina na površini uzorka, pri obradi sa dijamantskim točilom specijalne strukture za 30-60% manja, nego na površini brušenoj dijamantskim



Sl. 13. Izgled oštećenog površinskog sloja (II)

- a) oblik širenja pukotine po površini,
b) brazde nastale usled habanja
- Appearance of the damaged surface layer (II)
- a) Form of the crack propagation on the surface
b) Grooves formed due to wear
- Повреждённый поверхносный слой (ИИ)
- а) форма распространения трещины по поверхности, б) царапины износа

tocilom standardne strukture. Takođe, režimi brušenja nemaju uticaja na povećanje količine defekata. Ovo se objašnjava time, da su navedena oštećenja direktna funkcija kontaktnih opterećenja. To znači da je moguće korišćenjem odgovarajućih dijamantskih brusnih alata dobiti povoljniji raspored napona u površinskom sloju uzorka od silicijum nitridne keramike, a time i kvalitetniji alat od ovog materijala.

11. TERMIČKA OBRADA ALATA OD SILICIJUM NITRIDNE KERAMIKE

Pored izbora odgovarajućih dijamantskih brusnih ploča, poboljšanje kvaliteta reznih pločica se može postići i adekvatnom termičkom obradom ovih alata i to u završnoj fazi izrade. Pri tome se misli na: žarenje u vakumu ili oksidacionoj sredini, i na nanošenje gasno-faznih prevlaka.

Žarenje polikristalnog silicijum nitrida pri temperaturi $900-1400^\circ\text{C}$ omogućava zaravnjenje pukotina u površinskom sloju sa odgovarajućim povećanjem fizičko mehaničkih karakteristika. Pri ovom postupku dolazi do zasićenja šupljina pukotina amorfnim ili kristalno-oksidacionom fazom, koja se obrazuje tokom procesa visoko termičke oksidacije. Pri tome dolazi do promene kristalne rešetke i širina difrakcionih linija, a time i do relaksacije zaostalih napona.

Ispitivanje reznih osobina alata od silicijum nitridne keramike sa gasno-faznom pravljakom je pokazalo da kod ovog alata dolazi do povećanja postojanosti i do 3 puta (u oblasti fine i polufine obrade odlivaka od sivog liva SČ-32). Povećanje otpornosti na habanje je povezano sa smanjenjem broja defekata u površinskom sloju (slika 14 b - II). Sa druge strane, ovim postupkom se sužava oblast efikasne primene alata od silicijum nitridne keramike zbog smanjenja čvrstoće površinskog sloja pri

obradi kompozitnih materijala, kao i znatnom smanjenju postojanosti pri gruboj obradi sivog liva.

Nanošenje gasno-faznih prevlaka na radne površine alata dovodi do promene njihovih površinskih svojstava. Između gasno-faznih prevlaka i silicijum nitridne keramike formira se prelazna zona, čija je debljinu znatno manja od debljine prevlake i kreće se u granicama do 0,5 μm. Struktura prelazne zone je veoma homogena i veoma različita od strukture prevlake i alatnog materijala (slika 14 a). U prelaznoj zoni nisu otkrivene mikropore i mikropukotine, koje se obično nalaze u površinskom sloju keramičkog materijala posle brušenja uzoraka i koje mogu predstavljati inicijalna mesta za razvoj mikropukotina koje svojim rastom dovode do otkaza alata.

12. ZAKLJUČCI

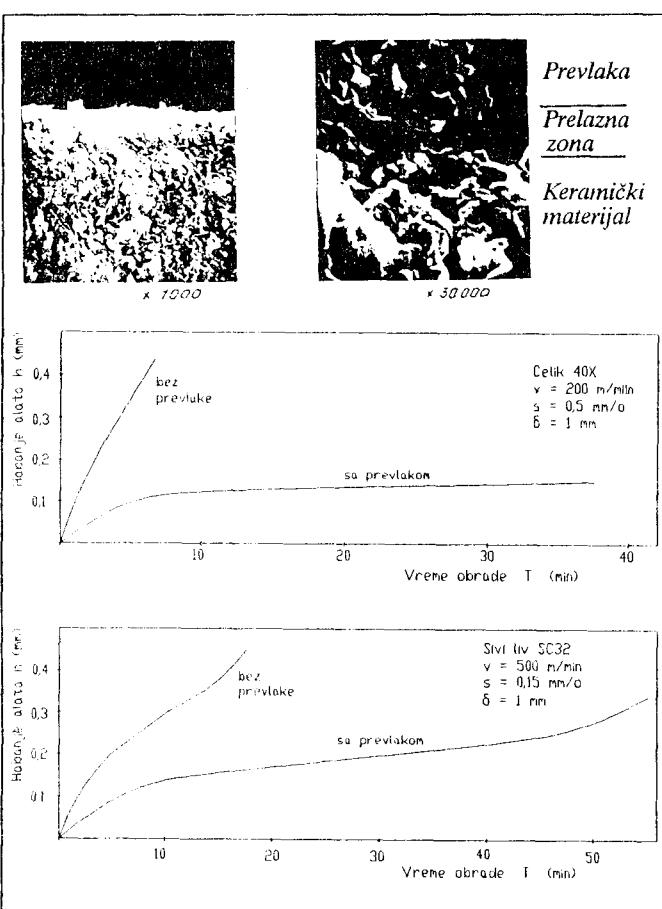
► Korišćenje reznih alata od silicijum nitridne keramike omogućava povećanje produktivnosti mehaničke obrade metarijala. Kao oblast racionalne primene ovih

alata, u današnjim uslovima je fina i gruba obrada odlivaka od sivog liva različitih kvaliteta, kao i fina obrada legura na bazi nikla. Takođe, ovi alati se mogu uspešno koristiti pri obradi termički obrađenih čelika velike tvrdote u slučajevima moguće zamene operacija brušenja.

- Mehanizam habanja alata od silicijum nitridne keramike pri obradi sivog liva je veoma složen i sadrži abrazivno habanje, plastičnu deformaciju reznog dela, pojavu i razvoj pukotina u materijalu sa kasnjim krzanjem alata. Na karakter habanja alata bitno utiču oksidacioni procesi pri temperaturama višim od 1000°C .
- Korišćenje reznog alata od silicijum nitridne keramike pri finoj obradi legura nikla omogućava povećanje brzine rezanja do 5 puta u poređenju sa alatima od tvrdog metalra. U većini slučajeva parametar usled koga dolazi do otkaza alata je habanje u vidu žlebova po leđnoj površini, čija vrednost iznosi do 2.0 mm .
- Povećanje primene reznih alata od silicijum nitridne keramike se može postići na više načina:
 - optimizacijom tehnoloških parametara procesa dobijanja polukristalnih keramičkih materijala,
 - odgovarajućom termičkom obradom i nanošenjem postojanih prevlaka na radne površine alata i
 - optimizacijom uslova obrade rezanjem, kao i poboljšanjem geometrije alata.

Kompleksno rešenje svih nabrojanih aspekata omogućuje da se ostvari značajno povećanje produktivnosti uz korišćenje alata na bazi silicijum nitridne keramike.

LITERATURA



Sl. 14. a) Površinski sloj kod alata od silicijum nitridne keramike sa prevlakama, b) Habanje rezne pločice od silicijumske nitridne keramike sa prevlakama TiC-TiCN-TiN
a) Surface layer of tool made of silicon nitride ceramics with coatings b) Wear of the cutting platelet made of silicon nitride ceramics with coatings of TiC-TiCN-TiN
a) Поверхность инструмента из кремнисто-нитридной керамики с покрытиями б) износ режущей пластиинки из кремнисто-нитридной керамики TiC-TiCN-TiN

- [1.] В. К. СТАРКОВ, В. В. КУЗИН Режущий инструмент из нитридо-кремниевой керамики, М., 1988., с. 60 + вкл., 16 ил. (Технология, оборудование, орг. и экол. машиностроит. пр-ва. Сер. 8. Инструментальное и технологическое оснащение металлообрабатывающего пр-ва: Обзор. информация (ВИИИТЭМР. Вып. 5)
- [2.] VIGNEAU J., BORDEF P., LEONARD A., Influence of the microstructure of the composite ceramic tool on their performance when machining nickel alloys // Annals of the CIRP. - 1987. - V.36 (1).
- [3.] Исследование теплового состояния режущих инструментов с помощью многопозиционных термоиндикаторов / Верещака А. С., Провоторов М. В., Кузин В. В. и др. // Вестник машиностроения, 1986., № 1, с. 4-49
- [4.] Д. Б. БОБРОВ, С. Я. ХЛУДОВ Оценка режущих свойств силинита-Р при точении конструкционных сталей // Исследования в области инструментального производства и обработки металлов, Тула: ТПИ, 1985., № 2, с. 120-123
- [5.] SIEBERT J.O., WUNSCH U.E., Automatisierungsgeräte Werkzeuge //VDI-z. -1985. - 127. N23/24. -S. 941-945.
- [6.] HANABUSA T., FUJIWARA H., FUJIMOTO J. DZAUPE // J. Soc. Mater. Sci. Jap. -1988. -37. №. 415. -212-218.

- [7.] D. VUKELJA, B. NEDIĆ, S. GAJIĆ, M. DIMITRIĆ, Projekti realizovani na ispitivanju i uvođenju reznih alata na bazi silicijum nitridne keramike u primenu i proizvodnju zajedno sa Elektrobošnom Jajce, 1988-1990.
- [8.] B. NEDIĆ, D. JOVIĆ, D. VUKELJA, Ispitivanje mogućnosti obrade struganjem termički obradenih čelika tvrdoće 60 HRC alatima na bazi silicijum nitrida, Savetovanje "Novi materijali" Biam 1990, Beograd.
- [9.] B. NEDIĆ, S. GAJIĆ, D. SALETA, Mogućnost primene novih alatnih keramičkih materijala na bazi silicijum nitrida u obradi rezanjem, 22. Savetovanje proizvodnog mašinstva, Ohrid, 1989.

**) Rad je nastao u okviru istraživanja na projektu "Revitalizacija postojećih tehnologija u industriji prerađe metala" koga su realizovali Mašinski fakultet iz Kragujevca i Tehnički fakultet iz Čačka, a sufinansiralo Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije.*

Perspectives of Applications of the Cutting Tools Made of Silicon Nitride Ceramics for the Purpose of Machining Processes Efficiency Increase

An important place in development of the series of cutting tools belongs to tools with the changeable platelets made of the silicon nitride ceramics. The high hardness and resistance to wear, as well as relatively high dynamic strength, enable successful application of these tools also for the rough machining of different kinds of materials.

In this paper are combined and systematized results of investigations obtained in Laboratory for metal machining at Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac and (Stanchion(Institute in Moscow.

The goal of the realized investigations, whose results are partially presented in this paper, was to study processes that are happening in the cutting zone, to establish laws of wear and to determine the tool life in conditions of machining the gray cast iron, alloyed steels, and thermally treated steels. Numerous investigations were related to measurement and analysis of: cutting forces, cutting temperatures and quality of the machined surface, for machining of different materials. Besides these, other investigations were done for the machining by discontinuous turning, as well as investigations in conditions of the super high cutting speeds. Analyzed was the influence of the tool geometry on toll life. Investigated was the influence of the surface layer state and grinding conditions on the quality of platelets. In order to find possibilities for improvement of the platelets cutting properties different processing's were applied to the surface layers like the thermal treating and application of coatings. Obtained results should serve for forming the recommendations for the more efficient application of these tools.

Перспективы использования режущего инструмента из кремнисто-нитридной керамики с целью повышения эффективности процессов резания

Среди современного инструмента значительное место принадлежит инструменту с заменяемыми пластины из кремнисто-нитридной керамики. Высокая твердость и износостойкость как и относительно большая динамическая прочность, обеспечивающей эффективное использование такого инструмента и в черновой обработке различного рода материалов.

В настоящей работе изложены объединенные и систематизированные результаты исследований, проведенных в Лаборатории по обработке металлов резанием Машиностроительного факультета в городе Крагуевац и в Институте "Станкин" в Москве.

Исследования проводились с целью изучения процессов, протекающих в зоне резания, вскрытия закономерностей изнашивания и определения стойкости инструмента при обработке серого чугуна, легированных и термически обработанных сталей. Большое внимание уделялось измерениям и анализу следующих параметров: сопротивлению резанию, температуре резания и качеству обработанных поверхностей различного рода материалов. Наряду с этим проводили и испытания в условиях прерывистого обтачивания сверхвысоких скоростей резания.

Исследовали также влияние состояния поверхности слоя и условий шлифования на качество пластинок. Одновременно разными способами обрабатывали поверхность слой (термическая обработка и нанесение покрытий), чтобы найти возможность для улучшения режущих характеристик пластинок. Полученные результаты следует использовать для установления рекомендаций по улучшению использования в этого инструмента.