

UNIVERZITET U BEOGRADU

MAŠINSKI FAKULTET

Milan D. Milutinović

**ISTRAŽIVANJE POSTOJANOSTI STRUGARSKOG  
NOŽA U PROIZVODNIM USLOVIMA  
PRI ORTOGONALNOM REZANJU**

doktorska disertacija

Beograd, 2015

University of Belgrade  
Mechanical Engineering Faculty

Milan D. Milutinović

**LATHE TOOL LIFE RESEARCH IN PRODUCTION  
ENVIRONMENT DURING THE ORTHOGONAL  
CUTTING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2015

Komisija za pregled i odbranu:

Mentor: Prof. dr Ljubodrag Tanović  
Mašinski fakultet u Beogradu

Članovi komisije: Prof. dr Ljubodrag Tanović  
Mašinski fakultet u Beogradu

Prof. dr Bojan Babić  
Mašinski fakultet u Beogradu

Prof. dr Radovan Puzović  
Mašinski fakultet u Beogradu

Prof. dr Aleksandar Venci  
Mašinski fakultet u Beogradu

Prof. dr Miloš Glavonjić  
Mašinski fakultet u Beogradu

Datum odbrane:

## **Izjave zahvalnosti**

U vrtlogu cikličnosti jednog naučnog metoda istraživač pored: strpljenja, opservacije, intuicije mora imati i sreću da, iz mnoštva činjenica koje ga okružuju, indukuje originalnu hipotezu koju će kroz eksperiment proveriti i da pri tom ona ima praktičnu primenu.

Ova teza nastala je kao posledica višegodišnjeg teorijskog i praktičnog rada u oblasti obrade metala rezanjem i predstavlja nadogradnju osnovnih principa i modela uzimajući u obzir najnovija istraživanja u ovoj oblasti.

Na kvalitet ove disertacije kao i dobijenih eksperimentalnih rezultata doprineo je veliki broj ljudi kojima dugujem zahvalnost.

Veoma sam zahvalan mentoru, prof. dr Ljubodragu Tanoviću koji mi je nesebično pomogao u svakoj fazi izrade ove teze: izbora teme, postavljanju istraživačkih ciljeva pa sve do oblikovanja ideja i zapažanja koje sam, uz njegovu pomoć, uspešno preveo u jasne matematičke modele.

Za uspešnu realizaciju eksperimentalnog dela disertacije zahvaljujem se Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu. Posebno se zahvaljujem prof. dr Radovanu Puzoviću na korisnim sugestijama oko akvizicije eksperimentalnih podataka.

Želeo bih da se zahvalim Katedri za tehnologiju materijala na Mašinskom fakultetu u Beogradu na ustupljenoj laboratoriji za tribologiju u okviru koje su izvršena merenja. Posebno se zahvaljujem prof. dr Aleksandru Venclu na nesebičnoj pomoći i sugestijama. Zahvaljujem se Filipu Vučetiću na angažovanosti oko merenja.

Duboku zahvalnost dugujem profesorima i asistentima Departmana proizvodnog mašinstva Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu: prof. dr Pavelu Kovaču, prof. dr Milenku Sekuliću i prof. dr Milanu Zeljkoviću na nesebičnoj pomoći i ustupljenoj laboratoriji. Posebno se zahvaljujem MSc Borislavu Savkoviću na angažovanosti oko merenja.

Zahvalan sam dr Slobodanu Ristiću dip.maš. inž., direktoru Tehnikum Taurunuma visoke inženjerske škole strukovnih studija na obezbeđenim materijalima za izvođenje eksperimenta i konstantnoj podršci i podstreku da što efikasnije radim na izradi disertacije. Takođe se zahvaljujem i ostalim kolegama na Tehnikum Taurunumu.

Najviše od svega želeo bih da se zahvalim: supruzi Irini, roditeljima Zorici i Draganu kao i bratu Milošu, jedinim bezuslovnim, najiskrenijim i najvatrenijim mojim navijačima kojima, pored sina Petra, posvećujem ovu disertaciju.

Beograd, oktobar 2015. godine

mom sinu **Petru**

What we do in life, echoes in eternity.

-Anonymous-

## **Istraživanje postojanosti strugarskog noža u proizvodnim uslovima pri ortogonalnom rezanju**

### **Apstrakt**

Obrada metala struganjem je jedan od najvažnijih proizvodnih procesa zato što pripremi dobijeni livenjem, kovanjem ili nekim drugim metodama obrade zahtevaju naknadnu obradu rezanjem kako bi se dobio finalni proizvod.

U ovom radu, postavljen je nov model ortogonalnog rezanja koji pored sila za formiranje strugotine obuhvata i dodatne sile koje se javljaju usled trenja između ledne površine alata i obrađene površine – upotpunjen Merçantov model sila. Model sila rezanja obuhvata dva stanja alata: idealno oštar alat sa pripadajućim silama za formiranje strugotine i alat sa dozvoljenom širinom habanja na leđnoj površini sa porastima komponenta sila rezanja koji nastaju usled trenja između alata i obratka. Sile za formiranje strugotine i dodatne sile postavljene su tako da se na efikasan način može odrediti ugao trenja između ledne površine alata i obrađene površine što je od izuzetne važnosti za određivanje tangencijalnog napona na leđnoj površini alata, kao i porasta komponenta otpora rezanja. Na ovaj način se tačnije predviđa sila rezanja.

U okviru disertacije razvijen je matematički model koji predviđa postojanost strugarskog noža u proizvodnim uslovima uzimajući u obzir korak, brzinu rezanja i širinu pojasa habanja ledne površine alata.

Izvedena eksperimentalna istraživanja potvrdila su autentičnost postavljenog matematičkog modela, pri čemu se vrednosti dobijenih rezultata nalaze u okviru standardnih devijacija.

**Ključne reči:** postojanost, habanje, sile rezanja, trenje, struganje

**Naučna oblast:** Mašinstvo

**Uža naučna oblast:** Proizvodno mašinstvo

**UDK:** 621.9.02:621.941(043.3)

## **Lathe tool life research in production environment during the orthogonal cutting**

### **Abstract**

Turning is one of the most important manufacturing operations because parts manufactured by casting, forming or other shaping process often require a further metal cutting operation before product is ready for use.

In this paper, the orthogonal cutting force model is proposed comprising forces due to friction in addition to the forces for chip formation – completed Merchant's force model. Cutting force model includes two tool conditions: perfectly sharp tool with accompanying forces for chip formation and tool with maximum permissible flank wear with accompanying forces generated due to the friction between tool flank and workpiece. Based on cutting force relationships between the wear (friction) forces and forces for chip formation, it is possible to analytically predict friction angle between the tool and workpiece. From pure geometrical relationships between forces the equation for the friction angle between the tool flank and workpiece can be derived, which is of the great importance in determining tangential stress at the tool flank surface and forces due to wear. In this way cutting forces are more accurately predicted.

This work presents the development of mathematical model for prediction of the lathe tool life in the production environment taking into account feed, cutting speed and flank wear width.

The series of experiments verified proposed mathematical models whereby the value of deviation of the results are within the standard deviation.

**Key words:** tool life, flank wear, cutting forces, friction, turning

**Scientific discipline:** Mechanical engineering

**Scientific subdiscipline:** Production engineering

**UDK:** 621.9.02:621.941(043.3)



## SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Pregled stanja istraživanja habanja-postojanosti pri ortogonalnom rezanju</b> .....	4
2.1 Istraživanje habanja i postojanosti alata u istraživačko razvojnim centrima industrijskoj praksi.....	7
2.2 Trenutni pristup modeliranju procesa rezanja.....	9
2.3 Modeli stvaranja strugotine.....	13
2.4 Metode merenja habanja alata.....	21
2.4.1 Direktno praćenje širine leđnog pojasa habanja alata.....	23
- Direktno praćenje širine leđnog pojasa habanja alata metodom gubitka zapremine pohabanog dela alata matematički model.....	23
2.4.2 Indirektno praćenje širine leđnog pojasa habanja alata.....	25
- Indirektno praćenje površine pohabanog dela alata na leđnoj površini merenjem otpora rezanja.....	25
- Indirektno praćenje širine leđnog pojasa habanja merenjem hrapavosti obrađene površine.....	26
- Indirektno praćenje habanja i postojanosti alata merenjem vibracija.....	28
- Indirektno praćenje širine leđnog pojasa habanja alata merenjem temperature.....	29
- Indirektno praćenje širine leđnog pojasa habanja obradom slike.....	30
- Indirektno praćenje širine leđnog pojasa habanja merenjem zvučnog pritiska.....	32
2.5 Vidovi habanja alata.....	33
2.6 Mesta habanja alata.....	35
2.7 Alatni materijali sa posebnim osvrtom na tvrde metale.....	41

2.7.1	Tvrđi metali.....	43
2.7.2	Oslojeni tvrđi metali-prevlake.....	44
<b>3.</b>	<b>Faktori koji utiču na brzinu, intenzitet, karakter procesa habanja alata i postojanost .....</b>	<b>45</b>
3.1	Faktori koji utiču na širinu leđnog pojasa habanja.....	47
3.1.1	Uticaj režima rezanja na širinu leđnog pojasa habanja alata....	47
3.1.2	Uticaj materijala obratka na habanje leđne površine alata.....	53
3.1.3	Uticaj materijala alata na habanje leđne površine.....	55
3.1.4	Uticaj otpora rezanja na širinu leđnog pojasa habanja alata.....	55
3.1.5	Uticaj radijusa vrha sečiva na habanje leđne površine.....	56
3.1.6	Uticaj prečnika obratka na širinu leđnog pojasa habanja.....	58
3.1.7	Uticaj sredstva za hlađenje i podmazivanje na leđni pojas habanja.....	58
3.2	Faktori koji utiču na otpore rezanja.....	60
3.2.1	Uticaj geometrije alata na otpore rezanja.....	60
3.2.2	Uticaj režima rezanja na otpore rezanja.....	65
3.2.3	Uticaj materijala obratka na otpore rezanja.....	66
3.3	Faktori koji utiču na postojanost alata.....	69
3.3.1	Uticaj režima rezanja na postojanost alata.....	69
3.3.2	Uticaj širine leđnog pojasa habanja alata na postojanost.....	72
3.4	Rangiranje faktora koji utiču na brzinu, intenzitet procesa habanja alata i postojanost.....	73
<b>4.</b>	<b>Osnove matematičkih modela koji definišu postojanost alata, širina leđnog pojasa habanja i otpore rezanja.....</b>	<b>76</b>
4.1	Definicija matematičkog modela sa osvrtom na modeliranje procesa rezanja.....	76
4.2	Pregled postojećih matematičkih modela postojanosti alata.....	77
4.2.1	Tejlorov model postojanosti alata.....	77
4.2.2	Džavahirov model postojanosti alata.....	78

4.2.3 Orbajev i Hajhrstov model postojanosti alata.....	79
4.2.4 Čaudrijevi model postojanosti alata.....	81
4.3 Pregled matematičkih modela koji definišu promenu širine leđnog pojasa habanja alata.....	81
4.3.1 Arčardov model habanja.....	82
4.3.2 Model promene leđnog pojasa habanja alata pri ortogonalnom rezanju koji se temelji na osnovu matematičkih modela Arčarda, Šoa i Dirkea.....	83
4.3.3 Promena zapremine pohabanog dela leđne površine u vremenu uzimajući u obzir mehanizme habanja (abrazivno, atheziono, difuzno) kao i definiciju pohabanog dela alata na bazi geometrije.....	84
4.3.4 Valdorfov model ortogonalnog rezanja koji uključuje habanje leđne površine alata.....	86
4.4 Merčantov model sila rezanja.....	88
<b>5. Matematički model sila rezanja i postojanosti strugarskog noža u proizvodnim uslovima.....</b>	<b>91</b>
5.1 U potpunosti Merčantov model sila pri ortogonalnom rezanju.....	92
5.2 Numerički primer.....	98
5.3 Očekivani izlaz i upotpunjenog Merčantovog modela sila pri otrogonalnom rezanju.....	100
<b>6. Eksperimentalna potvrda modela za predviđanje sila rezanja, postojanosti i diskusija dobijenih rezultata.....</b>	<b>101</b>
6.1 Metodologija i uslovi izvođenja ortogonalnog rezanja pri zahvatu struganja.....	102
6.2 Faze izvođenja eksperimenta.....	106
6.2.1 Opšti uslovi izvođenja eksperimenta.....	107
6.2.2 Habanje pločica- prva faza eksperimenta.....	109

6.2.3	Određivanje matematičkih modela postojanosti širine pojasa habanja na leđnoj površini alata i otpora rezanja. Merenje otpora rezanja. Odnos između komponenti otpora rezanja pri ortogonalnom rezanju – druga faza eksperimenta.....	114
6.2.4	Merenje koeficijenta trenja između leđne površine alata i obrađene površine – treća faza eksperimenta.....	133
<b>7.</b>	<b>Zaključak.....</b>	<b>138</b>
<b>8.</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>141</b>
	<b>Prilog.....</b>	<b>152</b>

## Nomenklatura

Oznaka	Jedinica	Opis
$\alpha$	[°]	Leđni ugao
$\beta$	[°]	Ugao reznog klina
$\delta$	[°]	Ugao nagiba linije $A_{n-1} A_n$
$\varepsilon$	[-]	Deformacija usled smicanja
$\phi$	[°]	Ugao smicanja
$\phi_n$	[°]	Ugao smicanja odgovarajuće ravni smicanja
$\gamma$	[°]	Grudni ugao
$\eta$	[°]	Karakterističan ugao u Valdorfovom modelu rezanja
$\eta_p$	[°]	Karakterističan ugao u Valdorfovom modelu rezanja
$\kappa$	[°]	Napadni ugao
$\lambda$	[°]	Ugao nagiba sečiva
$\mu$	[-]	Koeficijent trenja između strugotine i grudne površine alata
$\mu_1$	[-]	Koeficijent trenja između leđne površine alata i obrađene površine
$\rho$	[°]	Ugao trenja (strugotina-grudna površina alata)
$\rho_1$	[°]	Ugao trenja (alat-obrađena površina)
$\sigma_w(x)$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Normalni napon duž leđne površine alata
$\sigma_o$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Maksimalni normalni napon na leđnoj površini alata
$\bar{\sigma}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Srednji pritisak na pohabanoj leđnoj površini
$\zeta$	[°]	Ugao između sile rezanja kada je alat oštar i sile rezanja kada je alat zatupljen
$\tau_w(x)$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Tangencijalni napon duž leđne površine alata
$\tau_o$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Maksimalni tangencijalni napon na leđnoj površini alata
a	[mm]	Dubina rezanja

Oznaka	Jedinica	Opis
$a_1$	[mm]	Debljina strugotine
b	[mm]	Širina rezanja
V	[m/min]	Brzina rezanja
HRc		Tvrdoća po rokvelu
$A_\alpha$	[mm <sup>2</sup> ]	Leđna površina alata
$A_\gamma$	[mm <sup>2</sup> ]	Grudna površina alata
$B_L$	[mm]	Širina leđnog pojasa habanja alata
$B_{L(PL)}$	[mm]	Širina pojasa habanja alata na pomoćnoj leđnoj površini
$B_{sk}$	[mm]	Širina kratera habanja
$B_{dk}$	[mm]	Dubina kratera
$B_k$	[mm]	Dužina kratera
$B_\Delta$	[mm]	Skraćenje vrha alata
$B_{ck}$	[mm]	Rastojanje centra kratera od vrha alata
$B_{fk}$	[mm]	Početak kratera meren od vrha alata
$B_{ln}$	[mm]	Širina koncentracionog habanja (zareza)
$B_{Lb\max}$	[mm]	Maksimalna širina pojasa habanja
D	[mm]	Prečnik obratka
n	[o/min]	Broj obrtaja
r	[mm]	Poluprečnik zaobljenja radijusa vrha alata
s	[mm/o]	korak
$V_s$	[mm/min]	Brzina pomoćnog kretanja
T	[min]	Postojanost alata
t	[s], [min]	Glavno vreme rezanja-period rezanja
n	[-]	Eksponent koji zavisi od alata, obratka i režima rezanja
$T_R$	[min]	Referentna postojanost alata
$V_R$	[m/min]	Referentna brzina rezanja
$k_2$	[-]	Konstanta koje je u funkciji napadnog ugla i radijusa

Oznaka	Jedinica	opis
		zaobljenja vrha alata
m	[-]	Faktor koji uzima u obzir tip operacije
$k_1$	[-]	Konstanta koja uzima u obzir podmazivanje
$k_m$	[-]	Konstanta koja uzima u obzir tvrdoću obratka
$k_t$	[-]	Konstanta koje uzima u obzir povezanost geometrije alata sa otporom rezanja koji se posmatra
$\Theta$	[-]	Funkcija početnih uslova rezanja
$\psi$	[-]	Funkcija koja uzima u obzir odnos trenutnog i početnog odnosa otpora rezanja
$F'(B_L = 0)$	[N]	Sila rezanja kada je alat oštar
$F'(B_L \neq 0)$	[N]	Sila rezanja kada je alat zatupljen
$F'$	[N]	Sila rezanja
$F'_1$	[N]	Glavna sila rezanja
$F'_2$	[N]	Sila prodiranja
$F'_3$	[N]	Sila pomoćnog kretanja
$F'_s$	[N]	Sila smicanja strugotine
$F'_{sn}$	[N]	Normalna sila u ravni smicanja
$F'_n$	[N]	Normalna sila
$F'_t$	[N]	Tangencijalna sila
$A_c$	[mm <sup>2</sup> ]	Površina nedeformisane-nesabijene strugotine
C	[-]	Merčantova konstanta
$\Delta F'_1$	[N]	Porast glavne sile rezanja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja alata
$\Delta F'_2$	[N]	Porast sile prodiranja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja alata
$\Delta F'$	[N]	Porast sile rezanja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja alata

Oznaka	Jedinica	Opis
$\zeta$	[°]	Ugao između $F'$ ( $B_L = 0$ ) i $\Delta F'$
$F'_{1UK}$	[N]	Ukupna glavna sila rezanja
$F'_{2UK}$	[N]	Ukupna sila prodiranja
$p_i, q_i, y_i$	[-]	Parametri obradljivosti
$P_f$	[-]	Kinematska ravan kretanja



# 1. UVOD

---

Obrada metala rezanjem je jedan od najvažnijih proizvodnih procesa zato što pripremci dobijeni livenjem, kovanjem ili nekim drugim metodama obrade zahtevaju naknadnu obradu rezanjem kako bi se dobio finalni proizvod. U okviru ove teze istražuje se postojanost alata u proizvodnim uslovima pri obradi struganjem. U užem smislu, planirana istraživanja su fokusirana na sam proces obrade i razvoj pouzdanog matematičkog modela za analizu habanja na leđnoj površini alata i predviđanje sila koje se javljaju u procesu rezanja.

U toku procesa rezanja dolazi do habanja alata što utiče na njegovu postojanost i kvalitet obrađene površine. Literaturni izvori ukazuju da se preko 50% alata ne iskoristi sa aspekta postojanosti, pa je prema tome važno pouzdano predvideti postojanost u proizvodnim uslovima i iskoristiti alat u najvećoj mogućoj meri. Postoji više kriterijuma pomoću kojih može da se definiše postojanost alata: dostizanje dozvoljene širine pojasa habanja leđne površine, porast komponenata otpora rezanja, broj napravljenih komada itd. Pravilnim izborom režima rezanja, za zadate tehničke uslove (tačnost mera, oblika i kvalitet obrađene površine) kao i dobroj predikciji sila-otpore rezanja može se postići maksimalno iskorišćenje alata u proizvodnim uslovima, smanjenje troškova proizvodnje i zadovoljenje svih funkcionalnih zahteva dela koji je izrađen.

Postoji veliki broj israživačkih radova koji se bave predviđanjem sila rezanja koje se mogu svrstati u grupu indirektnih metoda praćenja postojanosti alata. Da bi se sila rezanja predikovala na pravi način mora se uzeti u obzir i porast sile rezanja usled trenja koje se generiše pri kontaktu pohabane leđne površine alata (širine leđnog pojasa habanja) i obrađene površine.

U ovoj disertaciji razvijen je matematički model sila rezanja koji objedinjuje dva stanja alata i to: idealno oštar alat sa pripadajućim silama (prema Merçantovom modelu) i pohaban alat sa pripadajućim silama koje se javljaju usled trenja između leđne površine alata i obrađene površine.

Istraživanja u okviru ove disertacije su obavljena na osnovu četiri polazne hipoteze:

- (i) Proces smicanja se odvija u ravni smicanja pri čemu je rezna ivica idealno oštra. Strugotina je kontinualna. Napon smicanja u ravni smicanja ima uniformnu raspodelu. Glavno sečivo je upravno na pravac relativnog kretanja alata u odnosu na obradak (ortogonalno rezanje) - Merčantov model ortogonalnog rezanja,
- (ii) Uvođenje širine pojasa habanja ledne površine alata u Merčantov model ne utiče na osnovni model stvaranja strugotine (ugao smicanja, ugao trenja između strugotine i grudne površine alata i napone smicanja),
- (iii) Zapremina pohabanog dela materijala alata po jediničnoj dužini proporcionalna je otporu prodiranja,
- (iv) Kao kriterijum pohabanosti alata uzima se dozvoljena vrednost širine pojasa habanja ledne površine alata  $B_L$ .

U disertaciji je naučno i eksperimentalno potvrđen koncept predviđanja sila pri ortogonalnom rezanju, uzimajući u obzir dozvoljenu širinu leđnog pojasa habanja i razvijen pouzdan matematički model koji predviđa postojanost alata u proizvodnim uslovima uzimajući u obzir najuticajnije parametre procesa obrade.

Tekst disertacije je organizovan u šest poglavlja, kroz koja su predstavljena obavljena istraživanja, uz zaključak kroz koji je dat osvrt na ostvarene rezultate, mogućnost praktične primene i u kome su najavljeni mogući pravci daljih istraživanja.

U prvom poglavlju date su osnovne informacije o potrebi i značaju predviđanja postojanosti strugarskog noža kao i sila rezanja u proizvodnom okruženju. Presentovane su polazne hipoteze kao i osnovni ciljevi i doprinosi predmetne disertacije i navedeni uslovi pod kojima oni važe.

U drugom poglavlju dat je pregled stanja istraživanja u oblasti habanja i postojanosti strugarskog noža pri ortogonalnom rezanju. Ukratko su objašnjeni važniji modeli stvaranja strugotine. Sistematizovane su metode merenja habanja alata (direktni i indirektni).

U trećem poglavlju predstavljene su parametri koji utiču na brzinu, intenzitet i karakter procesa habanja alata i postojanost. Na osnovu postojećih istraživanja sistematizovani su i predstavljeni faktori koji utiču na: širinu pojasa habanja ledne površine alata,

otpore rezanja i postojanosti alata. Izvršeno je rangiranje uticajnih faktora na brzinu, intenzitet procesa habanja alata i postojanost alata.

U četvrtom poglavlju data je sistematizacija osnovnih matematičkih modela koji definišu postojanost alata, kao i pregled matematičkih modela koji definišu promenu širine pojasa habanja leđne površine alata. U kratkim crtama pojašnjen je Merčantov krug sila pri čistom ortogonalnom rezanju.

U petom poglavlju predložen je matematički model sila u zoni rezanja koji objedinjuje dva stanja alata: idealno oštar alat sa pripadajućim silama i alat sa dozvoljenom širinom pojasa habanja leđne površine alata sa pripadajućim porastima komponenata otpora rezanja. Porasti komponenata otpora rezanja su posledica trenja između leđne površine alata i obrađene površine - upotpunjen Merčantov model sila pri ortogonalnom rezanju. Upopunjen Merčantov model sila omogućava da se na efikasan način odredi koeficijent trenja između leđne površine alata i obrađene površine na osnovu koga se lako određuju pomenuti porasti komponenata otpora rezanja i time se omogućava tačnije predikovanje sile rezanja.

U šestom poglavlju izvršena je eksperimentalna potvrda postavljenog matematičkog modela iz prethodnog poglavlja i izvršeno je poređenje rezultata dobijenih pomoću modela i eksperimentalnim putem, a stepen poklapanja potvrđuje ispravnost postavljenog modela.

U sedmom poglavlju dat je osvrt na rezultate istraživanja, uz odgovarajuću diskusiju, kao i pravce budućih istraživanja. Istaknuto je da postavljeni matematički modeli omogućuju uspešno predviđanje postojanosti alata u proizvodnim uslovima kao i tačnije predviđanje sila rezanja u poređenju sa postojećim modelima iz razloga što u ubzir uzimaju dodatne sile koje se javljaju usled postojanja pojasa habanja na leđnoj površini alata.

## ***2. PREGLED STANJA ISTRAŽIVANJA HABANJA-POSTOJANOSTI ALATA PRI ORTOGONALNOM REZANJU***

---

Razvoj i primena savremenih tehnologija u pravcu dobijanja proizvoda bez naknadne obrade je ograničenog domena, tako da je i danas obrada rezanjem najviše korišćen metod u proizvodnoj praksi.

U obradi metala, rezni alat se koristi da ukloni materijal na obratku u cilju dobijanja izratka potrebne tačnosti mera i kvaliteta obrađene površine [1].

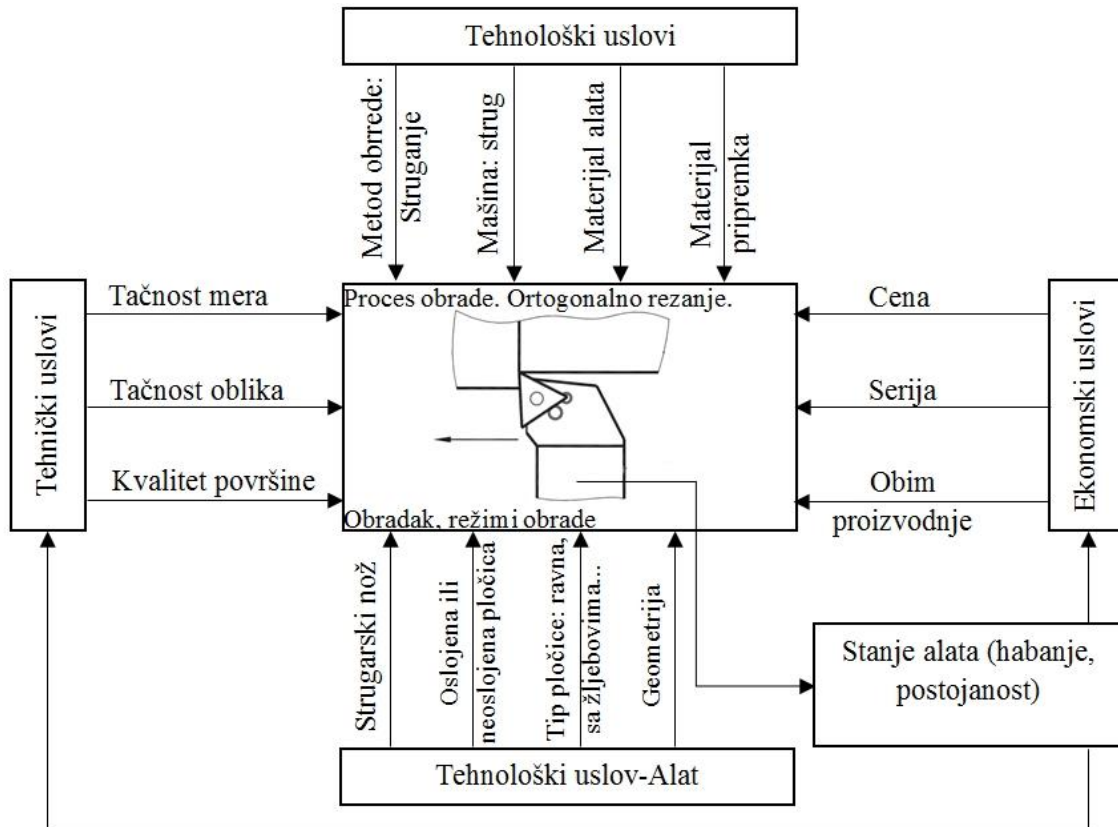
Pri obradi rezanjem neizbežna je pojava habanja alata koja sa postojanošću predstavlja izuzetno važne kriterijume na osnovu kojih se vrši procena performansi procesa obrade [2]. Rezni alati imaju ograničenu postojanost upravo zbog habanja (ravnomernog ili intenzivnog) koje rezultira njegovim zatupljenjem ili lomom. Neophodno je pronaći načine koji će:

- povećati postojanost alata,
- pouzdano predvideti postojanost u proizvodnim uslovima i iskoristiti alat u najvećoj mogućoj meri,
- pratiti habanje alata,
- dovesti do smanjenja proizvodnih troškova i jasno uspostavljenog kriterijuma trenutka zamene alata [3].

Stanje alata je važan faktor u bilo kojoj industriji obrade metala kao i dodatni troškovi, u pogledu izrade škarta, loma alata i neplaniranih zastoja koji su izazvani upotrebom prekomerno pohabanog alata [4]. Habanje je važan faktor koji direktno utiče na proizvodnost i kvalitet obrađene površine. Tradicionalno, u proizvodnim uslovima, izmena alata se vrši na osnovu iskustva operatera (posmatranjem -kombinacija gledanja i slušanja procesa obrade) ili vidljivo lošeg kvaliteta obrađene površine. Pravilnim izborom režima rezanja za zadate tehničke uslove kao i dobroj predikciji postojanosti

alata u proizvodnim uslovima može se postići maksimalno iskorišćenje alata, smanjenje troškova proizvodnje i zadovoljenje svih funkcionalnih zahteva dela koji je izrađen.

U disertaciji je posebna pažnja posvećena istraživanju habanja i postojanosti strugarskog noža u proizvodnim uslovima pri ortogonalnom rezanju. Na slici 1 prikazan je način na koji stanje alata sa ostalim uticajnim faktorima utiče na tehničke i ekonomske uslove pri izradi nekog dela.



Slika 1. Uticaj stanja alata na tehničke i ekonomske uslove pri izradi dela

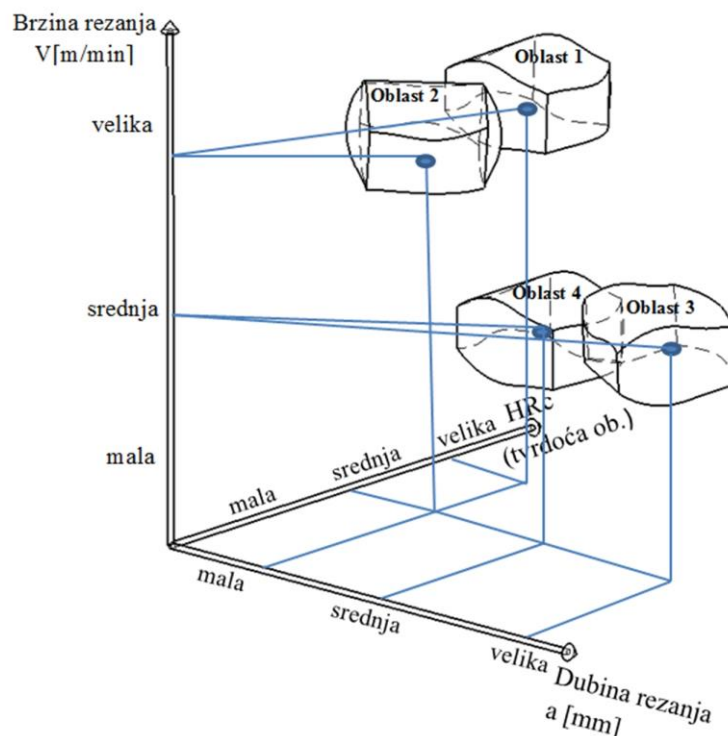
Čajdls, Trent i Rajt [5] su ukazali da je postojanost alata u direktnoj vezi sa habanjem reznog dela tako da poznavanjem mehanizama interakcije između alata i obratka može se uticati na nju. Važnost potrebe za naučnim pristupom kada se govori o postojanosti alata, habanju, izboru režima rezanja potvrđuje činjenica koju je objavila CIRP (The International Academy for Production Engineering-Međunarodna Akademija Proizvodnog Mašinstva) u jednom od svojih radova: '...U SAD tačan izbor alata koji se koriste sa nominalnom brzinom rezanja su na nivou 58% i samo se za 38% alata iskoristi puna postojanost...' [6].

Operacija struganja, pored glodanja, je jedna od najzastupljenijih u obradi metala rezanjem. Uzimajući u obzir brzinu rezanja  $V[m/min]$ , dubinu rezanja  $a[mm]$ , kao i tvrdoću obratka  $HRc$  mogu se uočiti četiri karakteristične oblasti režima struganja:

**Oblast 1-** odnosi se na obradu velikim brzinama rezanja kod kojih je obradak velike tvrdoće ( $55 HRc$ ), a dubina rezanja mala ( $a = 50 \mu m$ ). U pitanju je operacija završnog struganja i to pločicom sa prevlakom najčešće od kubnog bor-nitrida (CBN). Ovakav način završnog struganja može delimično zameniti proces brušenja. Alati se jako brzo habaju što predstavlja veliku manu sa aspekta ekonomske održivosti [7].

**Oblast 2-** odnosi se na obradu velikim brzinama rezanja sa malom ili srednjom dubinom rezanja. Obradak je srednje ili velike tvrdoće, što je karakteristično za završnu obradu nekog dela, slika 2.

**Oblast 3-** odnosi se na obradu srednjim ili malim brzinama rezanja sa velikom ili srednjom dubinom rezanja pri čemu je obradak srednje tvrdoće. Ovakvi režimi obrade karakteristični su za obrade na starijim konstrukcijama mašina alatki koje su bile masivne, sa livenom, robusnom nosećom strukturom, konvencionalnim mašinama alatkama, slika 2.



Slika 2. Obrada na strugu- karakteristične oblasti u funkciji: brzine rezanja, dubine rezanja i tvrdoće obratka

**Oblast 4-** odnosi se na obradu srednjim ili malim brzinama rezanja, srednjim dubinama rezanja pri čemu je materijal obratka srednje ili velike tvrdoće. Režimi rezanja koji pripadaju ovoj oblasti i danas su jako zastupljeni.

Uzimajući u obzir zastupljenost elemenata režima rezanja kod nas i u svetu kao i raspoloživost opreme, u ovoj disertaciji istraživanja habanja i postojanosti strugarskog noža pri ortogonalnom rezanju biće usmerena na režime koji pripadaju oblasti 4 i oblasti 1 iz predhodne klasifikacije.

## **2.1 Istraživanje habanja i postojanosti alata u istraživačko-razvojnim laboratorijama i industrijskoj praksi**

Neprekidna, bezbedna i ekonomična obrada zahteva:

- Sprečavanje preranog i iznenadnog otkaza alata,
- Smanjenje habanja alata u cilju povećanja postojanosti

Kako bi se navedeni ciljevi ispunili moraju se poznavati mogući načini habanja alata:

- Mehanička oštećenja usled prevelikih sila i udara. Ovakva vrsta habanja alata je katastrofalna po prirodi i vrlo je štetna za rezni deo alata,
- Brzo zatupljenje usled plastičnih deformacija nastalih zbog vibracija mehaničkih sila i toplote u zoni rezanja,
- Ravnomerno habanje leđne i grudne površine alata..

Prva dva načina habanja veoma su nepovoljna ne samo za alat već i za eksploataciju mašine alatke. Stoga, ove vrste habanja alata moraju biti sprečene upotrebom odgovarajućih materijala alata kao i geometrije koja zavisi od karakteristika materijala obratka i uslova obrade. Postepeno habanje alata je neizbežno i ne može se sprečiti ali se može usporiti u cilju povećanja postojanosti alata.

*Kriterijumi zatupljenja reznog dela alata u laboratorijama za istraživanje i razvoj:*

- Potpuni lom alata ili vrha alata,
- Veliko habanje u vidu krzanja rezne ivice,
- Naglo povećanje sila/otporna rezanja i/ili vibracija,
- Dostizanje granične vrednosti širine leđnog pojasa habanja ili kratera habanja.

*Kriterijumi zatupljenja reznog dela alata u industrijskoj praksi:*

- Naglo povećanje snage rezanja,
- Naglo povećanje vibracija ili promena zvuka tokom procesa obrade,
- Lom alata,
- Odstupanje mera u odnosu na propisane tolerancije,
- Pogoršanje kvaliteta obrađene površine,
- Nepoželjan način formiranja strugotine.

Habanje alata utiče na njegovu postojanost. Uopšteno, postojanost alata može se definisati kao sposobnost očuvanja njihovih reznih karakteristika u određenim eksploatacionim uslovima.

Gledano kroz laboratorijske uslove postojanost alata može se definisati kao: Stvarni period rezanja tokom koga se nov alat zadovoljavajuće eksploatiše nakon čega ga je neophodno zameniti ili preoštriti [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Savremeni alati retko prevremeno otkazuju ili se lome već se postepeno habaju sa porastom vremena upotrebe. U tom slučaju postojanost se može definisati kao vremenski period za koji se nov alat eksploatiše pre nego što dostigne određenu graničnu vrednost habanja.

Procena postojanosti alata ne mora se definisati samo kao efektivan vremenski period rezanja već se može definisati nekim drugim kriterijumima, u zavisnosti od situacije, kao što su:

- Broj izrađenih delova,
- Ukupna zapremina skinutog materijala sa obratka,
- Ukupna dužina rezanja.

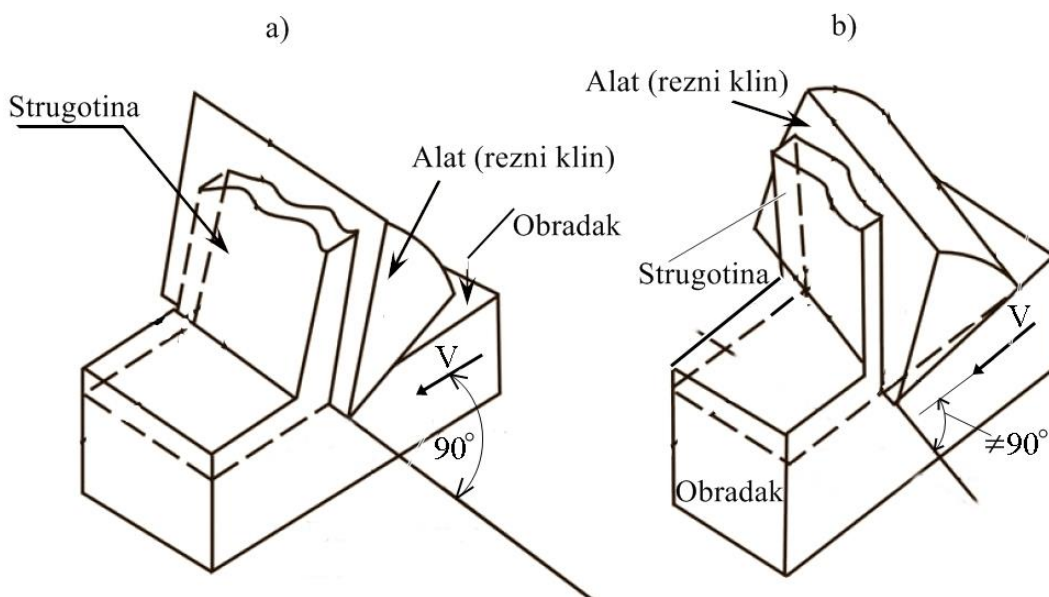


U industrijskoj praksi postojanost je vreme zadovoljavajuće eksploatacije alata ili vreme prihvatljivog rezanja novim alatom pre nego što je neophodno izvršiti njegovu zamenu ili preoštravanje.

## 2.2 Trenutni pristup modeliranju procesa rezanja

Rezanje nastaje pri prodiranju reznog klina alata u materijal pod dejstvom mehaničke sile. U zoni kontakta između radnih površina alata i materijala dolazi do plastičnog deformisanja, razaranja i odvođenja jednog sloja materijala koji se naziva strugotina.

U opštem slučaju razlikuju se koso i ortogonalno rezanje. Kada je pravac relativnog kretanja između alata i obratka normalan na sečivo reznog klina onda je u pitanju ortogonalno rezanje, slika 3a. Ukoliko je pravac relativnog kretanja između alata i obratka pod nekim uglom u odnosu na sečivo reznog klina, tada je to koso rezanje, slika 3b.



Slika 3. Prodiranje reznog klina alata u materijal pri: a) ortogonalnom i b) kosom rezanju

Postoje tri načina modeliranja sila za slučaj oštrog alata:

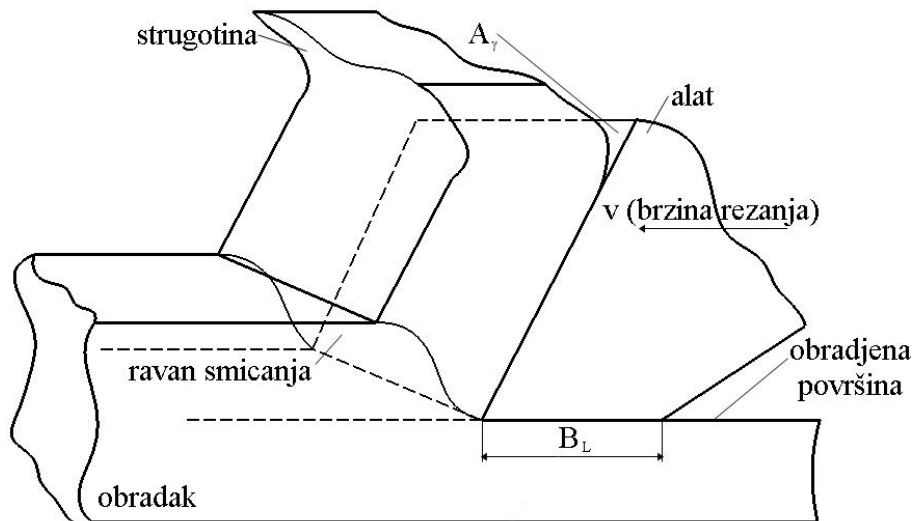
- **Teorijski pristup**- koristi kriterijum minimalne energije (Merçant, 1945; Usui, 1978) i teoriju plastičnosti (Li, 1951; Hil, 1954) kao osnove modeliranja procesa rezanja. Polazi se od toga da se ukupni utrošeni rad sastoji od: rada utrošenog u

ravni smicanja za formiranje strugotine, utrošenog rada sile trenja između strugotine i grudne površine alata dok je rad neophodan za odvajanje strugotine od obratka na samoj reznj ivici alata praktično zanemarljiv, [15].

- **Mehanistički pristup**- koristi minimalan broj eksperimenata sa oštrim alatom u cilju predviđanja sila rezanja uzimajući u obzir dijapazon režima rezanja i pod pretpostavkom da su sile rezanja proporcionalne preseku strugotine (Kapur, 1998; Armarego, 1999), [16].
- **Računarski pristup**- uključuje metod konačnih elemenata (Strenovski, 1995; Marusič, 1995; Guo 2002) i simulaciju molekularne dinamike (Komaduri, 2001)

Pomenuti modeli ortogonalnog i kosog rezanja podrazumevaju da je alat idealno oštar tako da se pri modeliranju sila rezanja ne uzimaju u obzir priraštaji sila usled postojanja širine leđnog pojasa habanja kao i habanja (kratera) na grudnoj površini alata. Neizbežna pojava habanja na grudnoj i leđnoj površini alata dovodi do promene efektivne geometrije alata koja uslovljava porast ili smanjenje sila rezanja.

Uzimajući u obzir da habanje leđne površine alata (širina leđnog pojasa habanja) ima veći uticaj na porast sila rezanja, u poređenju sa pojavom kratera na grudnoj površini, posebna pažnja biće posvećena modeliranju sila rezanja pri ortogonalnom rezanju (2D rezanju) koji uključuje širinu leđnog pojasa habanja kao i određivanju koeficijenta trenja  $\mu_1$  između leđne površine alata i obrađene površine, slika 4.

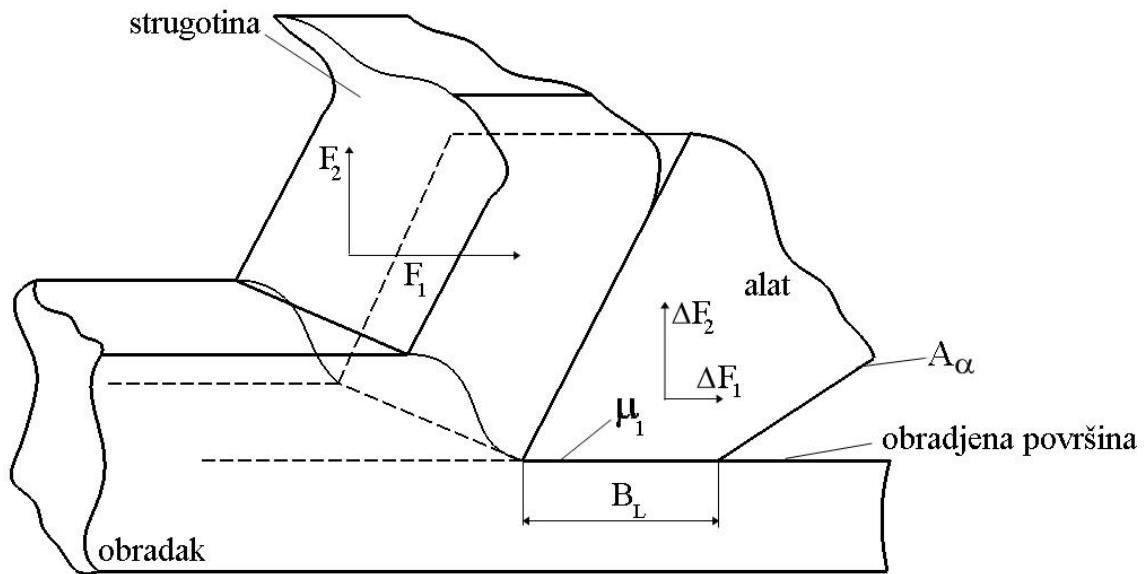


Slika 4. *Prodiranje reznog klina alata u materijal pri ortogonalnom rezanju i pojava habanja alata na leđnoj površini*

U literaturi nedovoljno su zastupljeni radovi koji uzimaju u obzir širinu leđnog pojasa habanja i efekat trenja između leđne površine alata i obrađene površine sa ciljem određivanja porasta sila rezanja i predviđanja postojanosti alata.

Poznavajući mehaniku procesa ortogonalnog rezanja kao i plan sila koje su definisane Merčantovim krugom sila može se zaključiti da su sile koje formiraju strugotinu međusobno zavisne za razliku od priraštaja sila rezanja koje nastaju kao posledica pojave širine leđnog pojasa habanja koje bi zavisile isključivo od empirijskog određivanja koeficijenta trenja između leđne površine alata i obrađene površine.

Uprošćeni prikaz modela ortogonalnog rezanja koji uzima u obzir širinu leđnog pojasa habanja alata kao i priraštaje sila-otpore rezanja usled efekta trenja između leđne površine pohabanog alata i obrađene površine prikazan je na slici 5.



Slika 5. Uprošćeni prikaz modela ortogonalnog rezanja koji uzima u obzir širinu leđnog pojasa habanja alata kao i porast otpora rezanja

Usled pojave trenja između leđne površine pohabanog alata i obrađene površine dolazi do povećanja otpora rezanja i to:  $F_1$  - glavni otpor rezanja,  $F_2$  - otpor prodiranja,  $\Delta F_1$  - porast glavnog otpora rezanja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja kao i trenja leđne površine alata i obrađene površine,  $\Delta F_2$  - porast otpora prodiranja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja kao i trenja leđne površine alata i obrađene površine.

Na osnovu uprošćenog prikaza modela ortogonalnog rezanja koji uzima u obzir habanje alata kao i efekat trenja moguće je definisati ukupan otpor rezanja kao:

$$F_{1UK} = F_1 + \Delta F_1 = F_1 + \mu_1 \cdot \Delta F_2 \quad (1)$$

$$F_{2UK} = F_2 + \Delta F_2 = F_2 + \frac{\Delta F_1}{\mu_1} \quad (2)$$

$$\mu_1 = \frac{\Delta F_1}{\Delta F_2} \quad (3)$$

gde je:  $\mu_1$  - koeficijent trenja između leđne površine alata i obrađene površine.

Ovakav matematički model biće proveren kroz eksperimentalna istraživanja u ovom radu. U ovom poglavlju dat je samo uprošćeni prikaz matematičkog modela, a detalji istog kao i njegova korelacija sa postojanošću biće prikazani u poglavlju 4.

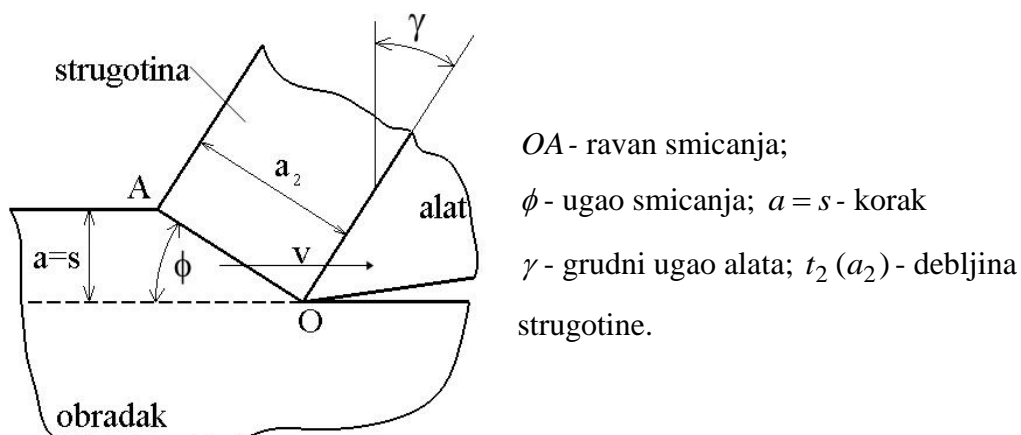
U poređenju sa kosim rezanjem model je daleko složeniji u odnosu na ortogonalno rezanje i zato se svi modeli sila kosog rezanja praktično svode na ortogonalno koristeći neki od postojećih metoda diskretizacije [61].

## 2.3 Modeli stvaranja strugotine

Obrada metala rezanjem predstavlja jednu od najstarijih metoda obrade u cilju dobijanja gotovog dela. Procenjeno je da više od 65% vrednosti mašinskih komponenti se odnosi na učešće tehnologija obrade rezanjem. Uprkos velikoj ekonomskoj i tehničkoj važnosti, obrada rezanjem i dalje ostaje jedna od nedovoljno teorijsko objašnjenih oblasti pa se iz tih razloga dosta radi na predviđanju i izboru mehaničkih modela stvaranja strugotine.

Navodi se nekoliko modela stvaranja strugotine:

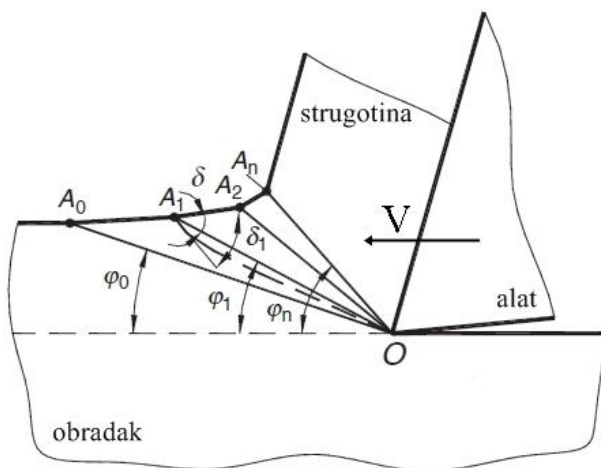
- Model rezanja sa jednom ravni smicanja – osnove ovog modela postavili su Pispunen, Fini, Zvorkin, Oksli, Okušima, Hitomi da bi na kraju celokupno istraživanje zaokružili Merçant i Ernest. Model rezanja sa jednom ravni smicanja postavljen je 1870. godine kao rezultat posmatranja procesa rezanja, slika 6.



Slika 6. Model rezanja sa jednom ravni smicanja

Sušтина ovog modela rezanja je da se obradak kreće brzinom rezanja  $V$  dok je alat stacionaran i ima grudni ugao  $\gamma$ . Alat odstranjuje materijal debljine  $a$  smicanjem, ispred alata, u zoni koja je prilično mala u poređenju sa svojom dužinom. Ravan u kojoj se vrši smicanje zove se ravan smicanja i definisana je uglom smicanja  $\phi$ . Nakon smicanja sloj materijala postaje strugotina debljine  $a_2$  koja klizi po grudnoj površini alata.

- Model rezanja koji uključuje familiju ravni smicanja. Briksov model [15]- Briks je osporavao model sa jednom ravni smicanja, a kao glavni argument navodi nemogućnost, sa aspekta deformacije metala, da se pomoću jedne ravni smicanja i odsustva glatke veze u tački A, pri čemu kretanje čestice koja je locirana u tački B u njenu odgovarajuću lokaciju C na strugotini je nemoguće, slika 6. Briksova pretpostavka odnosila se na postojanje zone prelaza, gde se deformacija i brzina transformacije materijala odvijaju glatko i kontinualno, koja se odnosi na sloj koji se skida i strugotinu. Plastične deformacije se odvijaju u zoni koja se sastoji od familije ravni smicanja ( $OA_1, OA_2, \dots, OA_n$ ) koje su postavljene u smeru kretanja kazaljke na časovniku, slika 7.

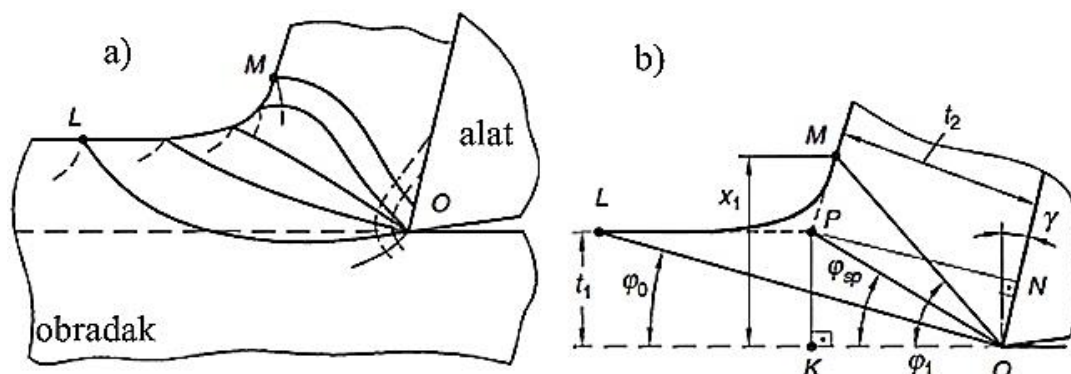


- $OA_n$  - ravan smicanja;
- $\phi_n (\varphi_n)$  - ugao smicanja odgovarajuće ravni smicanja  $OA_n$  ;
- $\delta$  - ugao nagiba ravni smicanja
- $A_{n-1}A_n$

Slika 7. Briksov model formiranja strugotine

Na ovaj način spoljašnja površina obratka i strugotine povezane su tranzicionom linijom  $A_0A_n$  koja se sastoji iz serije krivih linija  $A_{n-1}A_n$ . Kao rezultat ukupna deformacija sloja materijala koji se skida odvija se korak po korak u zoni deformacije gde svaka od ravni smicanja daje deo deformacije.

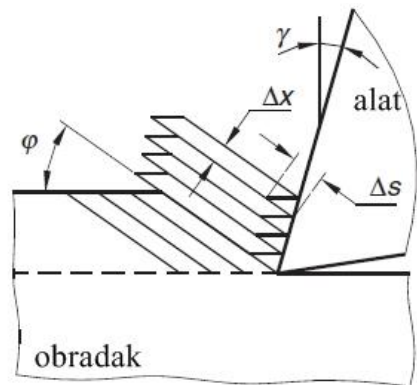
- Model rezanja pomoću linije klizanja. Model Zoreva - pokušao je da konstruiše polje klizanja u okviru zone deformacije koristeći osnovne karakteristike linije klizanja. Pretpostavio je da zona deformacije ustvari superpozicija dva nezavisna procesa: deformacije i trenja. Pokušao je da uspostavi linije klizanja nastale usled smicanja i linije klizanja nastale usled trenja između strugotine i grudne površine alata, slika 8.



Slika 8. Model formiranja strugotine Zoreva. a) kvalitativni model zone deformacije  $\Delta LOM$ , b) konačni uprošćeni model ( $\phi_{sp}(\phi_{sp})$ ) - specifičan ugao smicanja;  $OP$  - specifična ravan smicanja)

Prema Zorevu specifična ravan smicanja definisana je vrhom alata i presekom traga spoljnog sloja koji se skida i strugotine, tačka P slika 8. Jedna od bitnih činjenica koje je ustanovio Zorev je ta da ugao nagiba svake tranzicione linije, iz Briksovog modela, iznosi  $\delta = \pi/4$ .

- Merčantova modifikacija modela rezanja sa jednom ravni smicanja - ili model karata (lamela) je vrlo koristan i dobro ilustruje fizički značaj deformacije usled smicanja i omogućuje se razvije model za brzine u zoni rezanja. Ovaj model prikazan je na slici 9.



$\Delta x$  - konačna debljina elementarne strugotine;  
 $\Delta s$  - pomeraj elementa u odnosu na prethodni

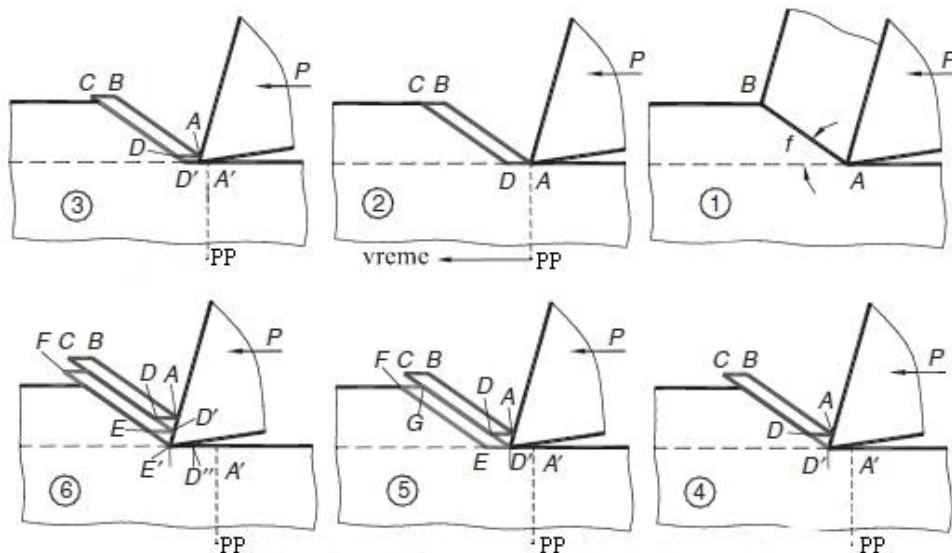
Slika 9. Merčantova modifikacija modela rezanja sa jednom ravni smicanja-model karata

Elementi u vidu karata-lamela imaju konačnu debljinu  $\Delta x$ . Svaka lamela pomerena je u odnosu na prethodnu za  $\Delta s$  pri procesu formiranja strugotine. Deformacija usled smicanja može se napisati kao [15]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta s}{\Delta x}, \quad \Delta x \rightarrow 0 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \cot \varphi + \tan(\varphi - \gamma) \quad (5)$$

Merčantov modifikovan model može se predstaviti u odnosu na vremensku osu u cilju razumevanja procesa formiranja strugotine, slika 10.



Slika 10. Merčantov model formiranja strugotine-model karata (lamela), početna pozicija (A'E')



Neka je  $AB$  ravni smicanja i neka je tačka  $A$  početna tačka procesa rezanja. Usled delovanja mehaničke sile  $P$ , formirana je prva lamela  $ABCD$  koja se još nije odvojila od materijala obratka duž linije  $AD$  (pozicija 2). Daljim prodiranjem alata u obradak dolazi do odvajanja lamele duž linije  $AD$ . Tačka  $A$  na strugotini odvojena je od tačke  $A'$  na obratku kao i tačka  $D$  od tačke  $D'$  (pozicija 3). Onda lamela  $ABCD$  klizi duž ravni smicanja sve dok rezna ivica ne dostigne tačku  $D'$  (pozicija 4). Nova lamela  $D'GFE$  (pozicija 5). Zatim se tačka  $D'$  na strugotini odvajaju od tačke  $D''$  na obratku kao i tačka  $E$  od tačke  $E'$  (pozicija 6) nakon čega se proces ponavlja.

Od svih navedenih modela, najbliži realnom procesu struganja je Briksov model, a najzastupljeniji u literaturi je modifikovan Merčantov model. Modifikovan Merčantov model na jedan lak način objašnjava mehanizam stvaranja strugotine i daje dobru aproksimaciju realnog procesa rezanja pod kontrolisanim uslovima. Veoma je važno prilikom modeliranja procesa rezanja (stvaranja strugotine) odabrati odgovarajući model rezanja uzimajući u obzir zadane režime. Modifikovan Merčantov model ortogonalnog rezanja ima smisla ukoliko režimi rezanja i tvrdoća materijala odgovaraju oblasti 1 i oblasti 2 (u slučaju kada su dubine rezanja veće od 0.1mm) slika 2.

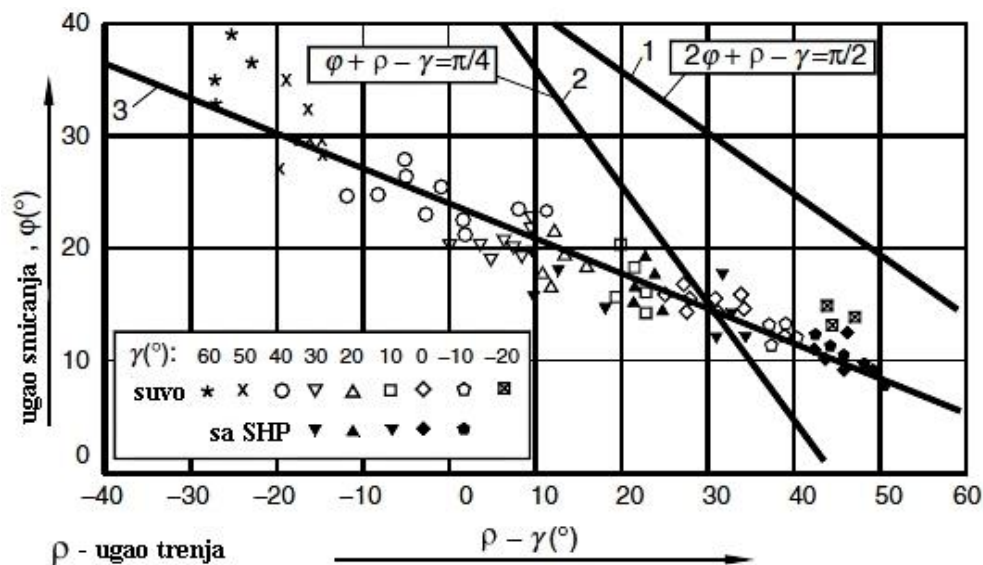
Suštinska razlika modela rezanja leži u određivanju ravni smicanja koja je definisana uglom smicanja. Ugao smicanja je važan u procesu rezanja sa aspekta određivanja sila rezanja. U tabeli 1 dat je analitički prikaz ugla smicanja koji je nastao kao rezultat različitih matematičkih modela procesa rezanja. Od svih navedenih analitičkih izraza izdvajaju se:

- Merčantov izraz za ugao smicanja koji se temelji na pretpostavci da će materijal početi sa smicanjem u ravni smicanja pod onim uglom smicanja koji obezbeđuje minimalnu količinu energije,
- Lee and Shaffer – ovaj izraz za ugao smicanja, koji je najbliži eksperimentalnim uslovima i
- Oksljev izraz za ugao smicanja.

Tabela 1. Analitički modeli ugla smicanja, [17]

<i>Model</i>	<i>Matematički izraz ugla smic.</i>	<i>Godina</i>
Ernest-Merčant	$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$	1941
Merčant	$\phi = \frac{C}{4} - \frac{1}{2}(\rho - \gamma)$	1945
Stabler	$\phi = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma}{2} - \rho$	1951
Li-Šafer	$\phi = \frac{\pi}{4} - (\rho - \gamma)$	1951
Huks	$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{a \tan(2\mu)}{2} + \gamma$	1951
Šo	$\phi = \frac{\pi}{4} - (\rho - \gamma) \pm \eta$	1953
Sata	$\phi = \frac{\pi}{4} - \gamma \pm \frac{\gamma - 15^\circ}{2}$	1954
Vais	$\phi = 57.4^\circ - (\rho - \gamma)$	1957
Kolding	$\phi = a \cot \left[ -\frac{2 \left( \frac{F}{H} + 2 \right)}{\frac{F}{H} + 1} \cot(2\Omega) - (\rho - \gamma) \right]$	1958
Oksli	$\phi = \rho - \beta + \gamma$	1961
Sata-Jošikava	$\phi = a \cot \left[ \cot \rho + \frac{\cos \rho}{\sin(\rho + \gamma)} kL \right]$	1963
-	$2\phi = \left[ \sin^{-1} \left( 1.104 \frac{\sigma_m}{\sigma_T} - 0.1045 \right) \right] + \gamma$	-

Uzimajući u obzir značaj ugla smicanja sprovedeni su eksperimenti u cilju utvrđivanja stepena poklapanja matematičkih modela sa eksperimentalno utvrđenim vrednostima ugla smicanja, slika 11.



Slika 11. Poređenje matematičkih modela ugla smicanja sa eksperimentalnim rezultatima: 1-Merčantov mode, 2-Li i Šafer, 3- eksperimentalni rezultati,[18]

Pored izbora režima rezanja, definisanja ugla smicanja Merčantov model rezanja obezbeđuje dobru aproksimaciju i predikciju sila rezanja u uslovima kada se kombinacijom materijala alata i obratka postiže kontinualna strugotina. Zbog važnosti materijali obratka, koji tokom rezanja obrazuju strugotinu, isti se mogu podeliti na: krte, žilave i izuzetno žilave u zavisnosti od stepena plastičnih deformacija koje materijal pokazuje. U tabeli 2 prikazane su vrste strugotine u zavisnosti od materijala koji se obrađuje kao i slikovito objašnjenje procesa formiranja strugotine kroz karakteristične faze.








- Ukoliko je materijal obratka krt, pukotina se pojavljuje ispred rezne ivice. Kasnije ova pukotina dovodi do konačnog loma sloja materija koji se odvajanja
- Ukoliko je materijal obratka žilav, pukotina ne bi bila vidljiva zbog žilavosti materijala koji izaziva efekat ‘zalečenja’. Ispred grudne površine alata formira se elastoplastična zona i tako otpočinje proces stvaranja strugotine.

*Strugotina oblika 1-* prikazuje generalizovan model nastajanja strugotine pri obradi krutih materijala. Pri obradi ovih materijala obezbeđuje se kontrolisana strugotina uz napomenu da na oblik strugotine veliku ulogu ima geometrija alata. Strugotina je u vidu pravougaonih elemenata.

*Strugotina oblika 2-* prikazuje strugotine koje su karakteristične za većinu žilavih materijala obratka. Kod ovih materijala postiže se kontinualna strugotina, a Merčantov model dobro aproksimira mehanizam nastanka strugotine.

*Strugotina oblika 3-* prikazuje strugotinu koja je karakteristična za izrazito žilave materijale obratka. Ovakva strugotina takođe se dobro aproksimira Merčantovim modelom ali se zbog kriterijuma bezbednosti radnika svrstava u kategoriju nepovoljnih strugotina.

Tabela 2. *Generalizovan model formiranja strugotine u zavisnosti od karakteristika materijala obratka. Oblici strugotine [18]*

Materijal obratka	Oblik strugotine	Model formiranja strugotine	Struktura strugotine
krt	I		Pravougaoni oblik strugotine, može da se kontroliše.
			Nepravilno oblikovana strugotina usled velike krtosti materijala obr.
žilav	II		Pravougaoni oblik strugotine sa plastičnim deformacijama, deformisana strugotina.
			Kontinualna strugotina.
Izuzetno žilav	III		Kontinualna strugotina sa konstantnom debljinom.
			Kontinualna strugotina. Nepovoljna po pitanju dužine i načina odvođenja.
			Kontinualna strugotina koja ima promenljivu debljinu i dužinu. Nepovoljna.

Na osnovu prethodnog, zaključuje se da je za izabrani model stvaranja strugotine važno uzeti u obzir dijapazon režima rezanja, materijal obratka i materijal alata u cilju ispravne predikcije sila rezanja čime se postiže zadovoljavajući stepen poklapanja sa

eksperimentalnim rezultatima. Važnost razumevanja različitih modela procesa stvaranja strugotine je u tome što obezbeđuju predviđanje: napona, sila, koeficijenta trenja između grudne površine alata i strugotine, debljine strugotine, što je od velikog značaja za definisanje geometrije alata, a što je najvažnije omogućava dobru zavisnost ulaznih parametara sa eksperimentalnim rezultatima.

## 2.4 Metode merenja habanja alata

Svaki sistem definišu proces, upravljanje i kontrolu stanja. Kada je reč o kontroli stanja ona se odnosi na:

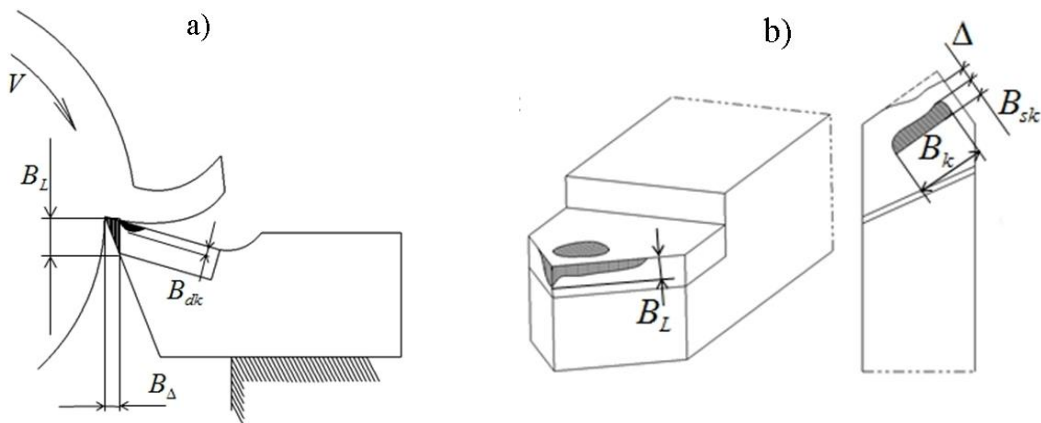
- mašinu alatku (dijagnostika i praćenje performansi),
- alat (stanje pohabanosti alata),
- obradak (mere, oblik i kvalitet obrađene površine)
- proces obrade u smislu praćenja formiranja strugotine, temperature ili snage rezanja.

Stanje alata je važan i uticajan faktor u obradi metala rezanjem jer može proizvesti dodatne troškove pri dobijanju škarta, loma alata kao i neplaniranih zastoja u proizvodnji uzrokovanih upotrebom pohabanog alata.

Prilikom procena performansi metoda merenja habanja alata treba imati u vidu da se:

- 15% greški odnosi na otkazivanje senzora,
- 45% greški odnosi se na procenu operatora mašine,
- 10% greški odnosi se na odabir pogrešnog metoda merenja,
- 20% greški odnosi se na neispravan interfejs mašine,
- 5% bez greški, [19].

Pri interakciji alata i obratka prikazani su fenomeni koji se kada je reč o alatu manifestuju u vidu habanja alata, slika 12.

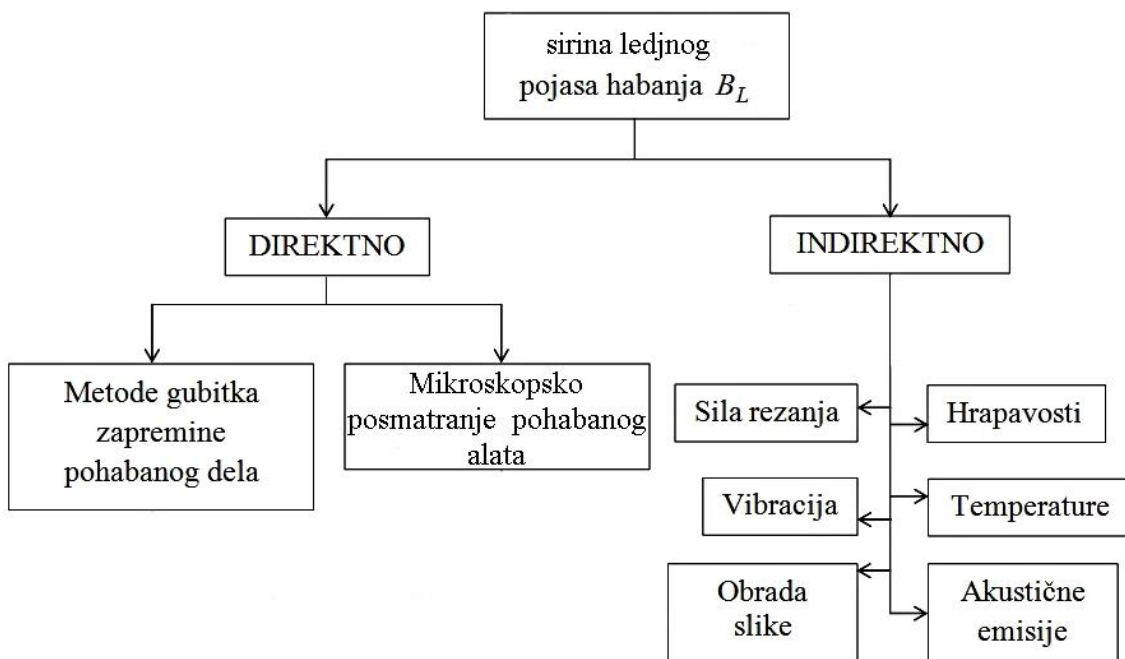


Slika 12. Mesta habanja strugarskog noža. a)  $B_L$  - širina pojasa habanja ledne površine alata,  $B_{\Delta}$  - skraćenje vrha alata,  $B_{dk}$  - dubina kratera; b)  $B_{sk}$  - širina kratera habanja,  $B_k$  - dužina kratera habanja, [20]

Habanje ledne površine alata definisano je širinom pojasa habanja ledne površine alata  $B_L$ , dok je habanje grudne površine alata definisano širinom kratera habanja  $B_{sk}$ , dubinom kratera  $B_{dk}$  i dužinom kratera  $B_k$ . Metode merenja odnose se na merenje pomenutih veličina. Uzimajući u obzir navedena mesta habanja alata, poseban akcenat je na uticaju širine pojasa habanja ledne površine i zbog čega se ovo mesto habanja uzima kao kriterijum zatupljenosti, odnosno postojanosti alata:

- Porast sila-otpora rezanja. Osetljivost sila rezanja (sile prodiranja i glavne sile rezanja, respektivno) na pojavu širine leđnog pojasa habanja [21],
- Promena širine pojasa habanja na leđnoj površini alata formira se u tri faze: inicijalnog, ravnomernog (uhodavanja) i intenzivnog [3],
- Kvalitet obrađene površine zavisi od širine pojasa habanja na leđnoj površini alata odnosno trenja između obrađene površine i leđne površine alata,
- Tačnost obrade.

Upravo zbog važnosti i uticaja širine leđnog pojasa habanja na slici 13 prikazane su moguće metode procene-merenja ovog oblika habanja alata.



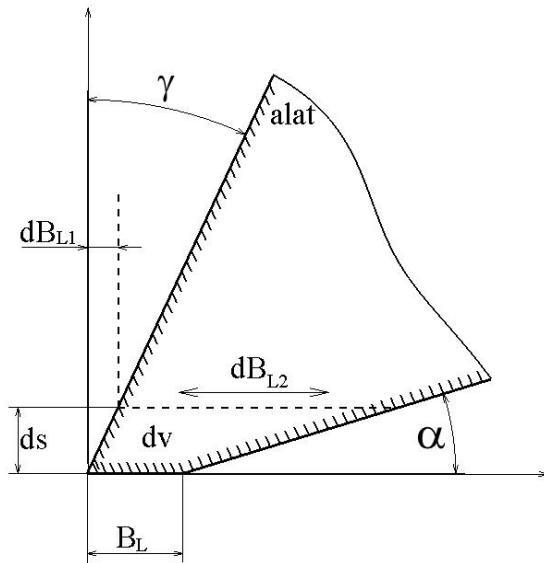
Slika 13. Metode merenja širine lednog pojasa habanja  $B_L$

#### 2.4.1 Direktno praćenje širine lednog pojasa habanja alata

Metode direktnog merenja odlikuju se time što se parametri habanja (širina lednog pojasa habanja) mere neposredno u toku odvijanja procesa obrade. U najvećem broju slučajeva direktno merenje habanja alata je vrlo otežano pa su i senzori habanja vrlo složeni i skupi. Direktno praćenje habanja alata je preciznije u odnosu na indirektno.

Direktno praćenje širine lednog pojasa habanja alata metodom gubitka zapremine pohabanog materijala dela alata. Matematički model.

U toku procesa rezanja dolazi do habanja alata usled poznatih mehanizama habanja (abrazivnog, atezivnog, difuznog, hemijskog) o kojima će biti više reči u poglavlju 1.5. Uzimajući u obzir važnost habanja ledne površine alata moguće je kroz matematički model odrediti funkciju promene zapremine pohabanog dela alata u toku vremena. Na slici 14 prikazan je model proračuna gubitka zapremine reznog dela alata usled habanja ledne površine.



gde su:

$dB_{L1}$  -priraštaj ili gubitak širine lednog pojasa habanja uslovljen grudnim uglom,  $dB_{L2}$  -priraštaj ili gubitak širine lednog pojasa habanja uslovljen lednim uglom,  $ds$  -elementarna visina,  $dv$  -elementarna zapremina pohabanog dela alata.

Slika 14. Gubitak zapremine reznog dela alata uslovljen postojanjem lednog pojasa habanja

Na osnovu slike 14 mogu se uspostaviti sledeće zavisnosti, (Džonas):

$$dB_L = dB_{L2} - dB_{L1} \quad (6)$$

$$dv = b \cdot ds \cdot \left( B_L + \frac{dB_L}{2} \right), \text{ b-širina rezanja} \quad (7)$$

$$ds = dB_L \cdot \left( \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma} \right) \quad (8)$$

$$dv = b \cdot B_L \cdot dB_L \cdot \left( \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma} \right) \quad (9)$$

Na osnovu izraza (4)-(7) uspostavlja se matematički model promene širine lednog pojasa habanja u toku vremena (Usui i Huang):

$$\frac{dB_L}{dt} = \left( \frac{(1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha)}{b \cdot B_L \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) \cdot C_1 \cdot \bar{\sigma} \cdot V \cdot \exp \left( -\frac{C_2}{T + 273} \right) \quad (10)$$

gde su:  $C_1, C_2$  -koeficijenti koji su specifični za svaku kombinaciju materijala alata i

obratka i određuju se eksperimentalnim putem,  $\bar{\sigma}$  -pritisk na pohabanu lednu površinu alata.



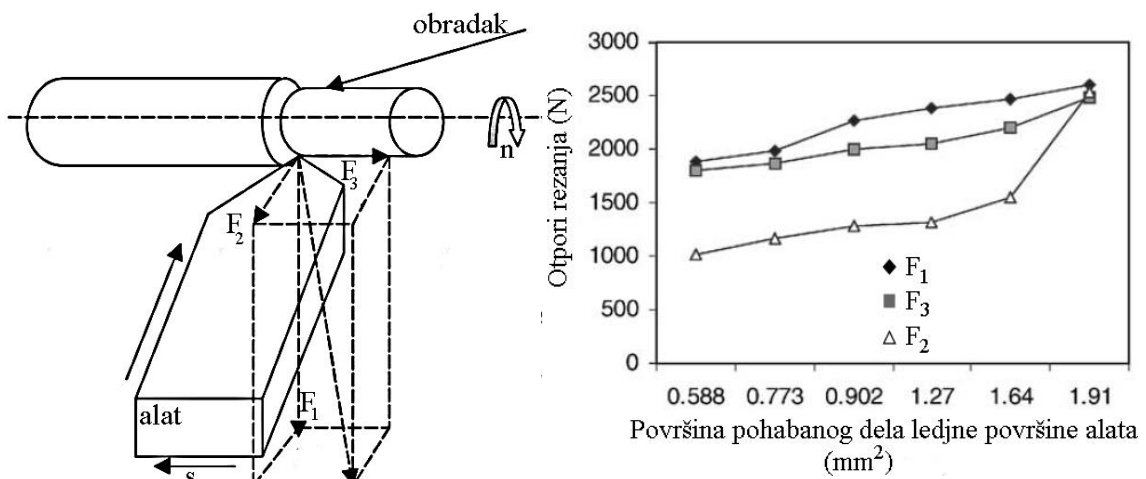
## 2.4.2 Indirektno praćenje širine leđnog pojasa habanja alata

Indirektno praćenje habanja alata zasnovano je na merenju sila-otpora rezanja, hrapavosti obrađene površine, temperature, vibracija, akustične emisije, kamerom-obrada slike. Indirektne metode merenja su pogodne i za 'on-line'-kontinualno praćenje habanja alata upravo iz razloga što se proces obrade ne prekida, [22]. Svi navedeni sistemi indirektnog merenja zasnovani su na principu da habanje alata izaziva povećanje otpora rezanja.

### Indirektno praćenje površine pohabanog dela alata na leđnoj površini merenjem otpora rezanja

Pojava habanja na leđnoj površini alata uslovljena je abrazivnim i athezivnim mehanizmima koji se dešavaju između leđne površine alata i obrađene površine. Leđno habanje počinje na samom vrhu alata zatim se širi kako se kontaktna površina povećava formirajući pojas leđnog habanja alata. Oblik i mere leđnog pojasa habanja alata zavise od materijala obratka i alata kao i režima rezanja.

Kao primer poslužiće obrada konstrukcionog čelika AISI 4340 tvrdoće 280 HB, alatom PCLNR sa karbidnom pločicom sa TiCN prevlakom, grudni ugao  $\gamma = -6^\circ$ , bez SHP-a sa režimima rezanja:  $V = 125 - 145 \text{ m/min}$ , korak  $s = 0.25 - 0.4 \text{ mm/o}$ , dubina rezanja  $a = 2 \text{ mm}$ , [23]. Habanje površine pohabanog dela alata na leđnoj površini mereno je optičkim mikroskopom nakon određenog vremena rezanja, a zatim je nastavljen proces obrade (uzdužnog struganja). Ovaj postupak se ponavlja sve do trenutka zatupljanja alata. Izmerene vrednosti otpora rezanja u zavisnosti od površine leđnog pojasa habanja prikazani su na slici 15. Sa porastom površine pohabanog dela alata na leđnoj površini rastu i otpori rezanja ( $F_1$ -glavni otpor rezanja,  $F_2$ -otpor prodiranja,  $F_3$ -otpor pomoćnog kretanja). Najveći je glavni otpor rezanja zatim otpor pomoćnog kretanja i na kraju otpor prodiranja. Sa slike 15 može se zaključiti koji je otpor rezanja najosetljiviji na porast površine pohabanog dela alata na leđnoj površini.



Slika 15. Otpori rezanja pri uzdužnom struganju. Zavisnost otpora rezanja i površine pohabanog dela leđne površine alata ( $V = 125 \text{ m/min}$ ,  $s = 0.4 \text{ mm/ob}$ ), [23]

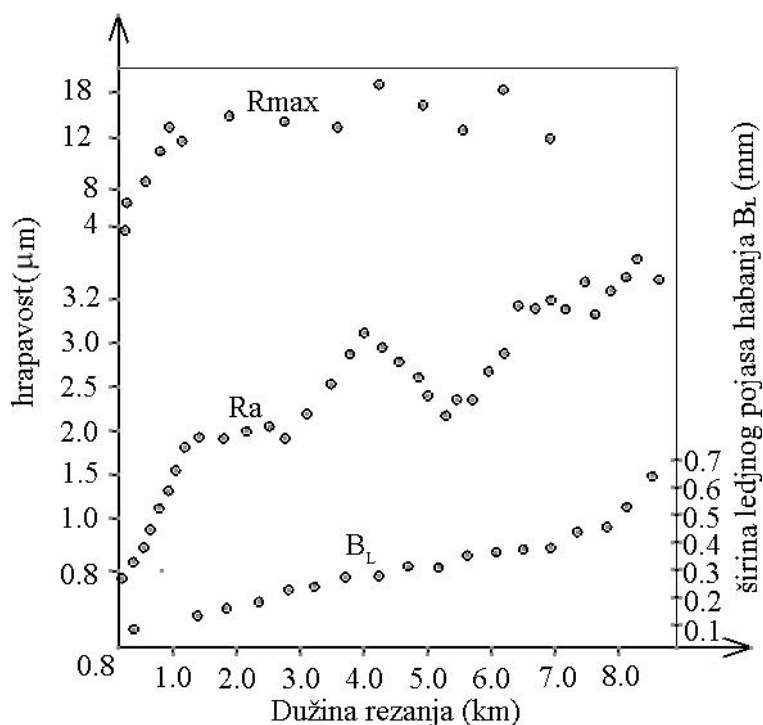
Najuticajnija komponenta otpora rezanja jeste otpor prodiranja  $F_2$  koja se povećava čak za 64% (u odnosu na početnu vrednost), otpor pomoćnog kretanja  $F_3$  povećava se za 13% dok se glavni otpor rezanja povećava svega 6%. Ovo pokazuje da je neophodno pokloniti posebnu pažnju otporu prodiranja odnosno radijalnoj komponenti otpora rezanja prilikom generisanja matematičkog modela rezanja i predviđanja postojanosti alata.

#### Indirektno praćenje širine pojasa habanja na leđnoj površini alata merenjem hrapavosti obrađene površine

Habanje leđne površine alata utiče na kvalitet obrađene površine tako da je između istih moguće uspostaviti zavisnosti koje bi bile od koristi za utvrđivanje postojanosti alata. To znači da promena odnosno pogoršanje kvaliteta obrađene površine predstavlja jedan od tradicionalnih kriterijuma zamene alata.

Veliki broj faktora utiče na kvalitet obrađene površine (vibracije mašine, alata, obratka i pribora), korak, radijus zaobljenja vrha noža i širina leđnog pojasa habanja alata kao i habanje alata po grudnoj površini. Odnos između maksimalne visine neravnine  $R_{\max}$ , srednjeg aritmetičkog odstupanja profila  $R_a$  i širine leđnog pojasa habanja alata  $B_L$  u

zavisnosti od dužine rezanja pri obradi konstrukcionog čelika AISI 1060 alatom sa karbidnom pločicom bez prevlake prikazan je na slici 16, [24].



Slika 16. Parametri hrapavosti ( $R_a$  i  $R_{max}$ ) i širina leđnog pojasa habanja  $B_L$  u funkciji dužine rezanja, [24]

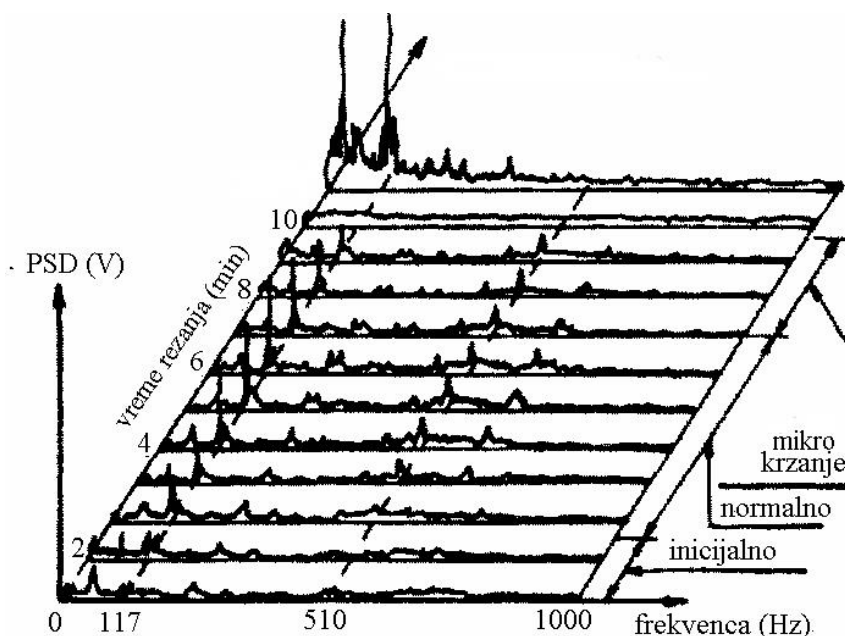
Eksperimentalni rezultati Petropoulosa pokazuju da se vrednosti  $R_a$  i  $R_{max}$  povećavaju sve dok širina leđnog pojasa habanja  $B_L$  dostigne vrednost 0.2mm. Preko ove vrednosti maksimalne visine neravnine  $R_{max}$  osciliraju oko konstantne vrednosti dok srednje aritmetičko odstupanje  $R_a$  pokazuje povećanje. Širina leđnog pojasa habanja povećava se kontinualno sa povećanjem dužine rezanja. Povećanjem širine leđnog pojasa habanja povećava se koeficijent trenja između alata i obrađene površine.

Uticaj širine leđnog pojasa habanja izraženiji je pri rezanju sa alatom koji nema prevlaku za razliku od karbidnih pločica sa prevlakom gde je uticaj  $B_L$  na parametre hrapavosti  $R_a$  i  $R_{max}$  mali sve dok se ne dostigne velika vrednost širine leđnog pojasa habanja tako da rezanje vrši podloga i u tom slučaju pouzdaniji kriterijum postojanosti alata jeste merenje vibracija.

### Indirektno praćenje habanja alata merenjem vibracija

Veliki broj autora (Jiang, Ksu, Rao, Akhito, Fudžita, Martin, Veler, Fang, Sokolovski, Kosmol) svoja istraživanja su bazirali na interakciji fenomena povezanosti vibracija alata i habanja. Suština merenja odnosa vibracija i habanja alata leži u izdvajanju signala koji se odnose na habanje alata. Eksperimenti su pokazali da se dijapazon frekvenci osetljivih na habanje kreće od 0-8000 Hz.

Matrtin, [24], nakon izbora opsega frekvence osetljive na habanje, je zaključio kada je odnos između signala generisanog pohabanim alatom i signala generisanog novim alatom prelazi vrednost 10 u tom trenutku izvršiti zamenu alata. Na slici 17 prikazan je uticaj habanja alata u različitom opsegu frekvencija.



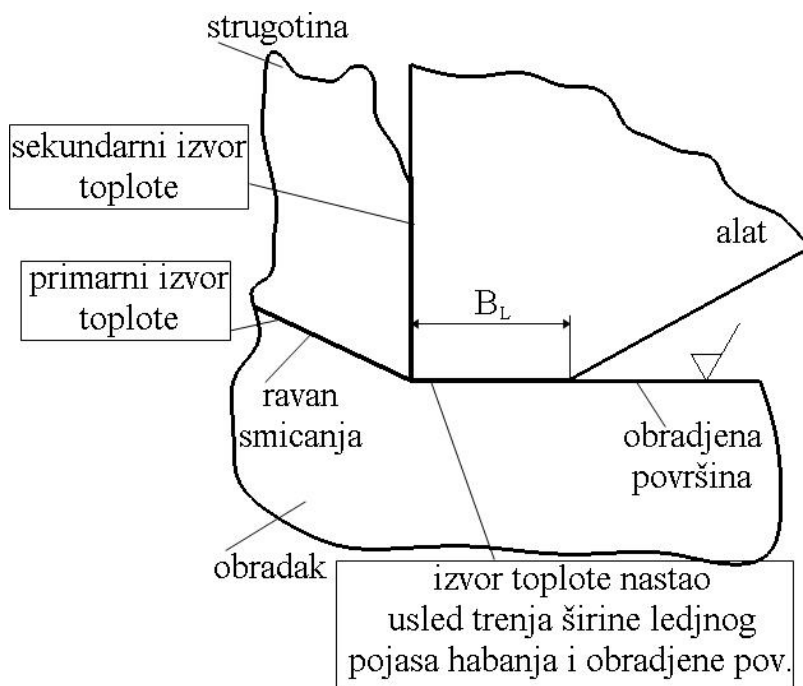
Slika 17. Uticaj habanja alata u različitom opsegu frekvencija, [24], gde je

*PSD (power spectral density)*

Sa slike 16 mogu se videti podela habanja alata u tri faze: inicijalno, ravnomerno i intenzivna faza u kojoj dolazi do mikro krzanja sečiva alata. Eksperimentalna istraživanja pri obradi materijala AISI 4340, oslojenom karbidnom pločicom, sa brzinom rezanja  $V = 300\text{m/min}$ , korakom  $s = 0.16\text{ mm/o}$  i konstantnom dubinom rezanja  $a = 1\text{mm}$  pokazuju sledeće: signali vibracija alata i kvalitet obrađene površine ponašaju se na sličan način kada se alat zatupi, praćenje signala vibracija alata daju dobre rezultate u dijapazonu od 0-8000 Hz kada se radi o završnoj obradi, [24].

### Indirektno praćenje širine leđnog pojasa habanja alata merenjem temperature

U toku procesa obrade javljaju se tri izvora toplote: primarni izvor odnosi se na količinu toplote koja se razvija u ravni smicanja, sekundarni izvor odnosi se na količinu toplote koja se razvila u zoni kontakta strugotine i grudne površine alata i treći izvor odnosi se na količinu toplote koja se razvija u zoni kontakta između leđne površine alata i obrađene površine, slika 18.



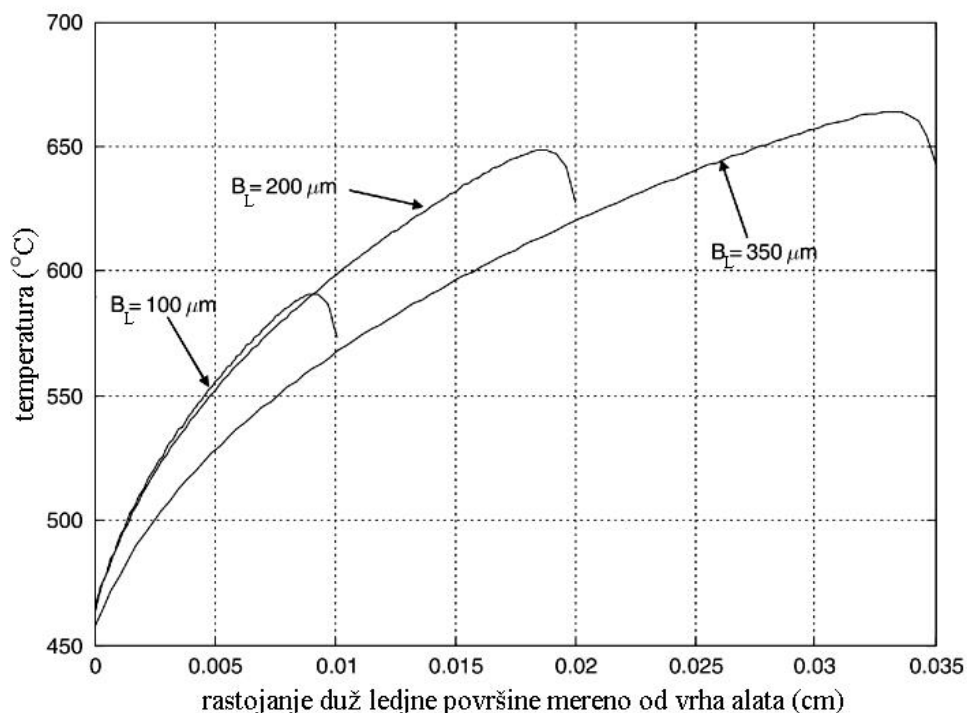
Slika 18. Izvori toplote u zoni rezanja

Usled pojave pojasa habanja sa širinom  $B_L$  dolazi do povećanja koeficijenta trenja između alata i obrađene površine odnosno dolazi do povećanja temperature.

Moguće je izvršiti merenje temperature duž leđne površine alata u zavisnosti od širine leđnog pojasa habanja i na taj način uspostaviti kriterijum habanja, slika 19.

Huang i Liang zaključuju da se pri obradi čelika AISI 1018 karbidnom pločicom sa grudnim uglom  $\gamma = 7^\circ$  i dubinom rezanja  $a = 5.16\text{mm}$  dolazi do:

- Povećanja temperature duž leđne površine alata sa povećanjem širine leđnog pojasa habanja i pri povećanju brzine rezanja,
- Smanjenja temperature duž leđne površine alata pri povećanju koraka.



Slika 19. Zavisnost između rastojanja duž leđne površine mereno od vrha alata i temperature [25]

Eksperimentom je ustanovljeno da temperatura na leđnoj površini alata neznatno utiče na temperaturu koja se generiše između strugotine i grudne površine alata.

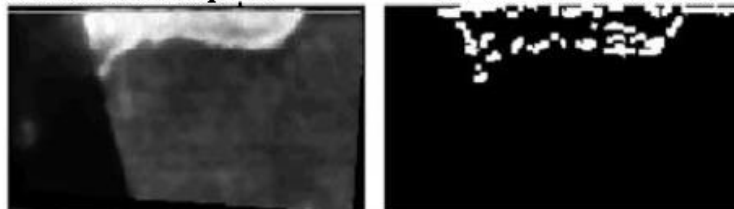
#### Indirektno praćenje širine leđnog pojasa habanja obradom slike

Ovaj metod podrazumeva da se alat, koji je osvetljen na ispravan način, slika CCD kamerom i tako dobijena slika se :

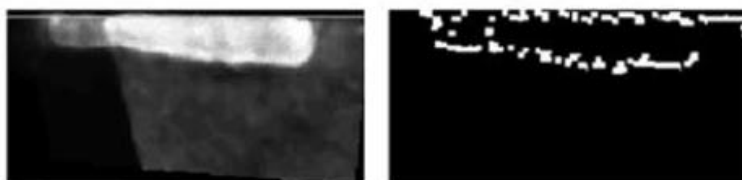
- Početno obradi – u smislu filtriranja i priprema za lakšu identifikaciju ivica odnosno kontura,
- Uradi histogram – obrađuje sliku i poboljšava kontrast,
- Odredi prag – kreiranje binarne slike,
- Izolovanje kritične površine – kodiranje linija i segmenata. Kritična površina se uvećava i vrši merenje širine leđnog pojasa habanja.

Na slici 20 prikazana su tri slučaja habanja alata na leđnoj površini i to uporedni prikaz između slike dobijene merenjem alatnim mikroskopom i slike dobijene obradom slike koja je dobijena CCD kamerom.

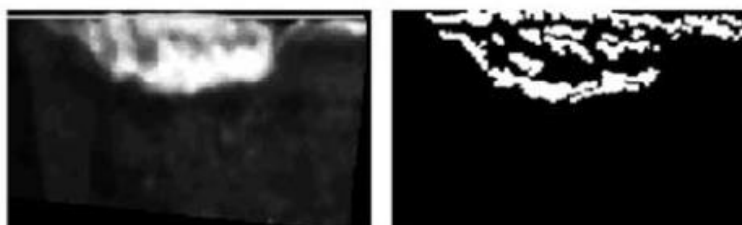
Vrednosti  $B_L$  dobijene merenjem  
**alatnim mikroskopom:**                      Vrednosti  $B_L$  dobijene  
**kamerom-obradom slike:**



**Srednja vrednost**  
 $B_{LS} = 197.8 \mu\text{m}$



**Srednja vrednost**  
 $B_{LS} = 205.1 \mu\text{m}$



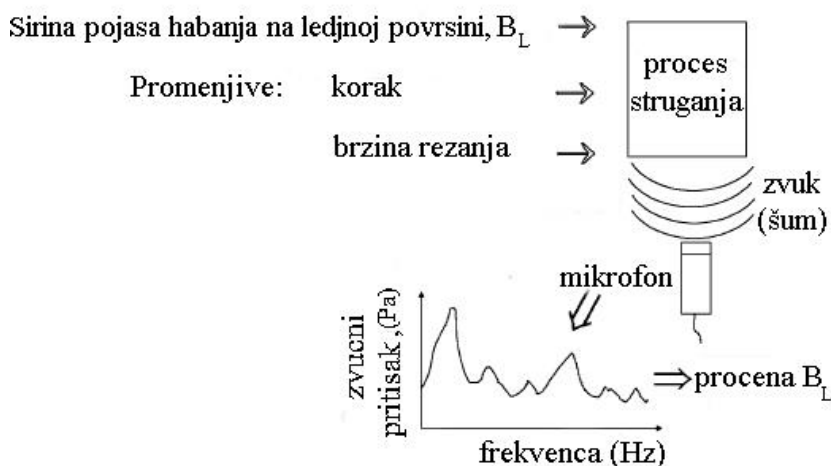
**Srednja vrednost**  
 $B_{LS} = 299.5 \mu\text{m}$

Slika 20. Širine leđnog pojasa habanja dobijene na alatnom mikroskopu i obradom slike, [26]

Poređenjem rezultata merenja širine pojasa habanja metodom obrade slike u odnosu na metod merenja alatnim mikroskopom, utvrđena je greška do 5%, što ovaj metod preporučuje za primenu u industrijskoj praksi.

### Indirektno praćenje širine leđnog pojasa habanja merenjem zvučnog pritiska

U opštem slučaju, promena brzine rezanja, koraka, broja obrtaja i dubine rezanja utiču na promenu zvuka procesa obrade. Određivanje habanja alata ili loma alata bila bi nezavisna od bilo koje druge varijacije zvučne emisije dobijene kombinacijama režima rezanja. Koncept merenja habanja leđne površine alata metodom akustične emisije prikazana je na slici 21.



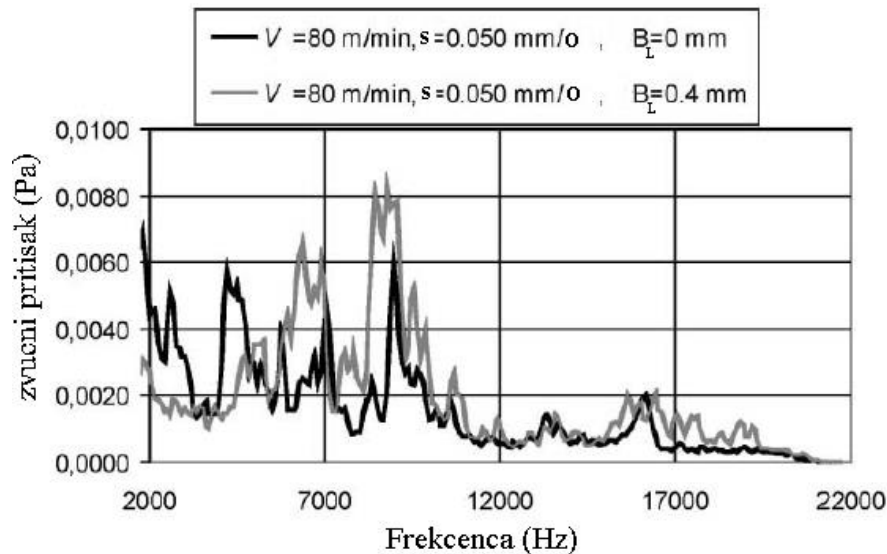
Slika 21. Koncept merenja zvučnog pritiska

Kada se varira korak i brzina rezanja uz postojanje širine leđnog pojasa habanja alata proces struganja emituje zvuk ili šum koji detektuje mikrofon koji je postavljen na pola metra od zone rezanja. Mikrofon detektuje zvučni pritisak koji služi za procenu širine leđnog pojasa habanja, [27].

Na slici 22 su prikazani dobijeni rezultati izmerenog zvučnog pritiska nastalog pri obradi čelika za cementaciju č 1221 pri sledećim režimima rezanja:

- brzina rezanja  $V = 80m/min$
- korakom  $s = 0.125 mm/o$ ,
- širini leđnog pojasa habanja  $B_L = 0.4mm$  i  $B_L = 0mm$





Slika 22. Uticaj širine leđnog pojasa habanja na zvučni pritisak, [27]

Kao što je i očekivano, varijacije širine leđnog pojasa habanja, brzine rezanja i koraka pokazuju da sva tri parametra utiču na promenu zvučnog pritiska pri obradi čelika za cementaciju. Kada su brzina rezanja i korak konstantni efekat promene širine leđnog pojasa habanja dolazi do izražaja i utiče na promenu zvučnog pritiska. U opštem slučaju, povećanjem širine leđnog pojasa habanja alata rezultuje povećanjem zvučnog pritiska što pokazuje da je ovakav način praćenja habanja alata moguć u industrijskoj praksi, [27].

## 2.5 Vidovi habanja alata

Pri relativnom kretanju dve spregnute površine dolazi do pojave trenja i habanja. Habanje alata uslovljeno je kontaktom između alata o obratka kao i silama koje se generišu u zoni rezanja. Na brzinu odnosno intenzitet habanja utiče veliki broj faktora od kojih se izdvajaju:

- brzina relativnog kretanja,
- veličina površinskog pritiska,
- koeficijent trenja,
- materijali elemenata koji su u dodiru,
- kvalitet spregnutih površina,
- vrsta sredstva za hlađenje i podmazivanje,

- temperatura u zoni rezanja,
- vreme trajanja relativnog kretanja između spregnutih površina.

U zavisnosti od toga koji su faktori dominantni mehanizmi habanja alata mogu se klasifikovati, vidovi habanja:

- atheziono,
- abrazivno,
- difuziono,
- hemijsko,
- oksidaciono.

Pored habanja na alatu mogu se uočiti i plastično deformisanje, krzanje sečiva i lom.

Za izabrani materijal alata i obratka habanje alata zavisi od režima rezanja, pri čemu su najuticajni: brzina rezanja, nedeformisana debljina strugotine i kombinacije pomenutih dominantnih vidova habanja.

Adheziono habanje predstavlja osnovnu i najznačajniju vrstu habanja materijala pri klizanju tela u međusobnom direktnom dodiru. Ova vrsta habanja javlja se uvek kada postoje uslovi za neposredan dodir površina. To je slučaj, ne samo kod nepodmazivanih površina tela u klizanju, već i pri podmazivanju elemenata i delova mašina, kada sloj maziva ne razdvaja potpuno spregnute površine (granično i mešovito podmazivanje) [28].

Abraziono habanje U literaturi se navodi da je abrazija najizraženija vrsta habanja. Preko 50 % svih oštećenja usled habanja je izazvano abrazijom. To je najočiglednija vrsta habanja čiji je mehanizam delovanja izrazito mehaničke prirode. Generalno, razlikujemo dva slučaja abrazije: abraziju dva tela i abraziju tri tela. Abrazija dva tela nastaje kada tvrdi materijal klizi po mekšem i izaziva brazdanje mekšeg materijala ili brazdanje materijala izazivaju tvrde čestice koje su utisnute u jedan od materijala u kontaktu. Kod abrazije tri tela imamo čestice koje nisu utisnute ni u jedan od dva materijala u kontaktu, već se slobodno kotrljaju i/ili klizanju i izazivaju brazdanje materijala tj. abraziju [28].

Difuziono habanje nastaje pri visokim temperaturama gde dolazi do difuzije molekula nekog od hemijskih elemenata alata na obradak. Ovakav vid habanja karakterističan je za veliki korak i brzinu rezanja, naročito kada postoji hemijska srodnost između materijala alata i obratka, na primer obrada aluminijuma alatima od alatne keramike, [29].

Hemijsko habanje najčešće nastaje u zoni rezanja, gde se pojavljuje hemijska interakcija između materijala alata i obratka u hemijski aktivnoj sredini sredstva za hlađenje i podmazivanje.

Oksidaciono habanje nastaje takođe u zoni rezanja pri velikim brzinama rezanja, tj. visokim temperaturama. Pojavom oksidacionog sloja dolazi do slabljenja materijala tako da se isti može lako odstraniti drugim vidovima habanja.

Plastične deformacije, krzanje i lom alata nastaju pri visokim temperaturama i silama rezanja. Rezultat su plastične deformacije alata u smislu promene geometrije alata i gubljenja inicijalnih reznih sposobnosti.

## **2.6 Mesta habanja alata**

Prilikom procesa obrade neizbežno je habanje alata. U opštem slučaju habanje alata je postepen proces koji se može opisati jednim ili sa više dominantnih mehanizama habanja. Postoje i slučajevi prekomernog habanja koji se manifestuju lomom alata ali se oni u praksi ne dešavaju često, [30].

Postoje dva mesta habanja na leđnoj i gudnoj površini alata: leđni pojas i krater habanja. Krater habanja javlja se usled visokih temperatura koje su nastale usled trenja strugotine i grudne površine alata. Prekomerni krater habanja mehanički slabi režno sečivo alata i može dovesti do prevremenog loma alata. Eksperimentalno je dokazano da postojanje kratera habanja, sa merama koje su u dozvoljenim granicama, menja efektivnu geometriju alata i utiče na smanjenje otpora rezanja. Leđni pojas habanja predstavlja postepeno habanje alata, a posledica je trenja između leđne površine alata i obrađene površine. Uobičajeni način definisanja postojanosti alata obuhvata vreme koje nov alat

pređe do trenutka dostizanja određene vrednosti širine leđnog pojasa habanja. U tabeli 3 prikazane su prosečne dozvoljene vrednosti širine leđnog pojasa habanja za strugarske noževe, [31].

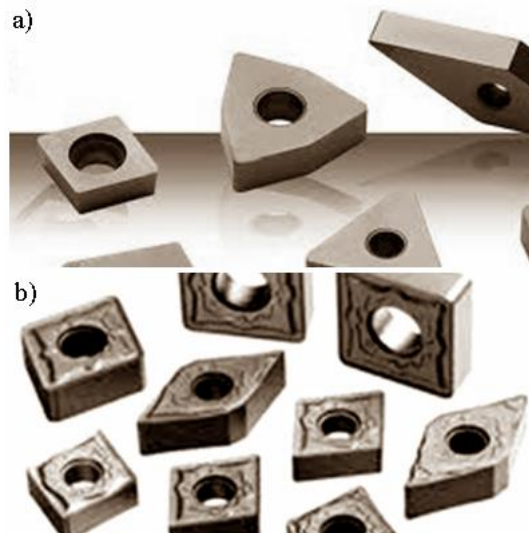
Tabela 3. Prosečne dozvoljene vrednosti širine leđnog pojasa habanja pri struganju

Materijal alata	Tip alata	Materijal obratka	zahvat	Dozvoljene vrednosti širine pojasa habanja na leđnoj površini $B_{L,doz}$ [mm]	
				bez SHP	sa SHP
Brzorezni čelik, HSS	spoljašnje struganje	čelik, kovano liveno gvožđe	grubo struganje	0.5-1.0	1.5-2.0
			fino struganje	0.3-0.5	
		sivi liv	fino struganje		
			grubo struganje	3-4	
	bušenje i usecanje	čelik, kovano liveno gvožđe	grubo struganje	0.3-0.5	1.5-2.0
		sivi liv	grubo struganje	1.5-2.0	
	odsecanje, parting tool	čelik, kovano liveno gvožđe	grubo struganje	0.3-0.5	0.8-1.0
	profilni noževi	čelik	grubo struganje		0.4-0.5
za navoj	čelik	grubo struganje		2	
Sinterovan karbid (tvrđi metal)	svi tipovi	čelik	grubo i fino struganje	0.8-1.0	
		sivi liv	grubo struganje	1.4-1.7	
Sinterovan metal oksid	svi tipovi	čelik i liveno gvožđe	fino struganje	0.8	

Alati za zahvate struganja sa izmenljivim pločicama od tvrdog metala mogu se podeliti na:

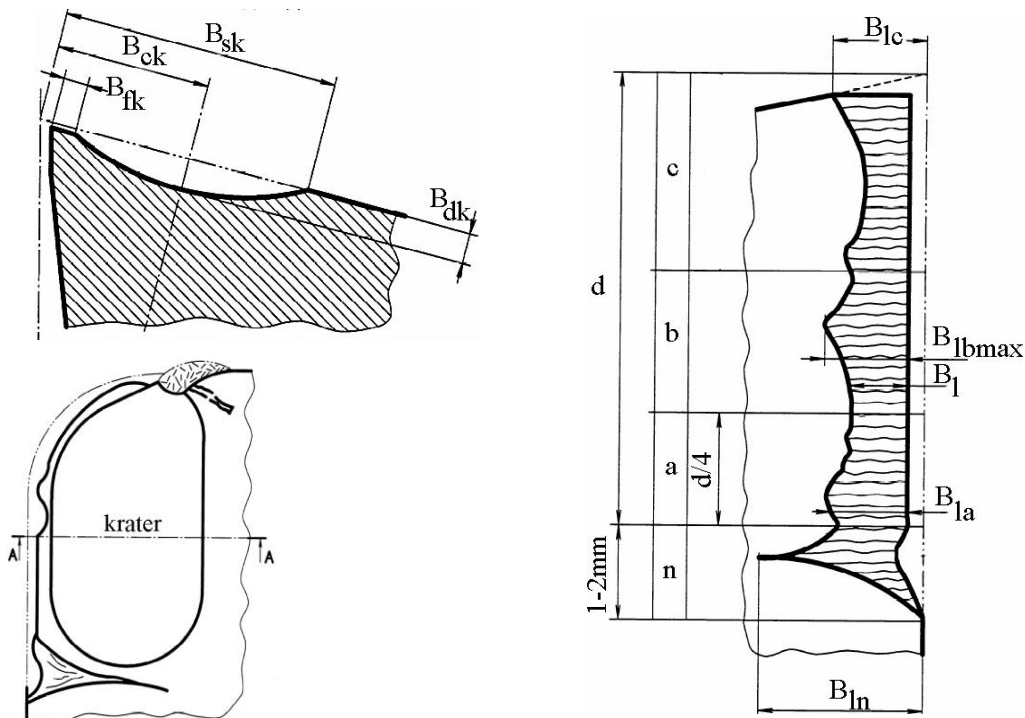
- ravne pločice,
- sa lomačima strugotine i
- sa kanalima za odvođenje strugotine, slika 22.

Kada se govori o oblicima habanja alata treba voditi računa koji se tipovi reznih pločica koriste. Kada se vrši obrada sa klasičnim pločicama od tvrdog metala kao mera postojanosti alata uzimaju se dozvoljene vrednosti habanja na grudnoj i leđnoj površini alata (širina leđnog pojasa habanja  $B_L$ , širina kratera habanja  $B_{sk}$ , dužina kratera habanja  $B_L$  i dubina kratera  $B_{dk}$ , slika 12).



Slika 23. Tipovi reznih pločica: a) ravne i b) sa kanalima

Mesta habanja na pločicama od tvrdog metala prema ISO 3685 prikazani su na slici 24.



Slika 24. Mesta habanja na pločicama od tvrdog metala prema ISO 3685, [32].

Na grudnoj površini alata nalazi se krater habanja gde su:  $B_{sk}$  - širina kratera,  $B_{ck}$  - rastojanje centra kratera od vrha alata,  $B_{fk}$  - početak kratera meren od vrha alata i  $B_{dk}$  - dubina kratera. Dubina kratera može da se proglasi kao dominantan kriterijum habanja. Krater habanja je uticajniji kod sečiva alata od tvrdog metala nego kod alata od brzoreznog čelika ili alatne keramike. Preporučene maksimalne dozvoljene vrednosti dubine kratera habanja kod ravnih pločica od tvrdog metala u zavisnosti od koraka date su u tabeli 4.

Tabela 4. Vrednosti dubine kratera habanja, [32]

Korak $s$ , $mm/o$	0.25	0.4	0.63
Dubina kratera $B_{dk}$ , mm	0.14	0.18	0.25

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja uspostavljena je korelacija između dubine kratera habanja i koraka (važi za alate od tvrdog metala):

$$B_{dk} = 0.06 + 0.3 \cdot s \quad (11)$$

Pojava kratera habanja na grudnoj površini alata dovodi do pogoršanja kvaliteta obrađene površine, pri čemu je položaj početka kratera na grudnoj površini alata veoma uticajan. Krater koji počinje na većem rastojanju od vrha alata manje je opasan od kratera koji se nalazi skoro uz sam vrh alata. Rastojanje centra kratera od vrha alata predstavlja mesto gde je krater najdublji, a meren je u zoni b, slika 24.

Kada je u pitanju habanje ledne površine alata dominantan oblik habanje jeste širina lednog pojasa habanja. Radi lakšeg merenja karakterističnih mera oblika habanja glavno režno sečivo je podeljeno na četiri zone, i to:

Zona a predstavlja jednu četvrtinu dužine rezne ivice d,

Zona b predstavlja preostali prav deo reznog sečiva koji se nalazi između zona a i c,

Zona c predstavlja kriv deo reznog sečiva – radijus zaobljenja,

Zona n predstavlja nastavak izvan površine kontakta između alata i obratka jedan do dva milimetra duž glavnog reznog sečiva, u ovoj zoni nalazi koncentraciono habanje sa karakterističnom merom  $B_{Ln}$ , slika 23.

Habanje ledne površine alata je uniformno u zoni b tako da je meru  $B_L$  lako izmeriti.

Obično se maksimalna širina pojasa habanja  $B_{Lb\max}$  u zoni b uzima kao kriterijum zatupljenosti alata. U slučaju alata sa pločicom od tvrdog metala uobičajeni su sledeći kriterijumi:

- Maksimalna širina leđnog pojasa habanja  $B_{Lb\max} = 0.6\text{mm}$  ukoliko pojas habanja nije uobičajeno pohaban u zoni b.
- Prosečna širina leđnog pojasa habanja  $B_{Lb} = 0.3\text{mm}$  kada je alat uobičajeno pohaban u zoni b.

Habanje vrha alata i njegova deformacija ne bi trebalo koristiti kao kriterijum habanja. Deformacija vrha alata dovodi do brže pojave intenzivnog habanja.

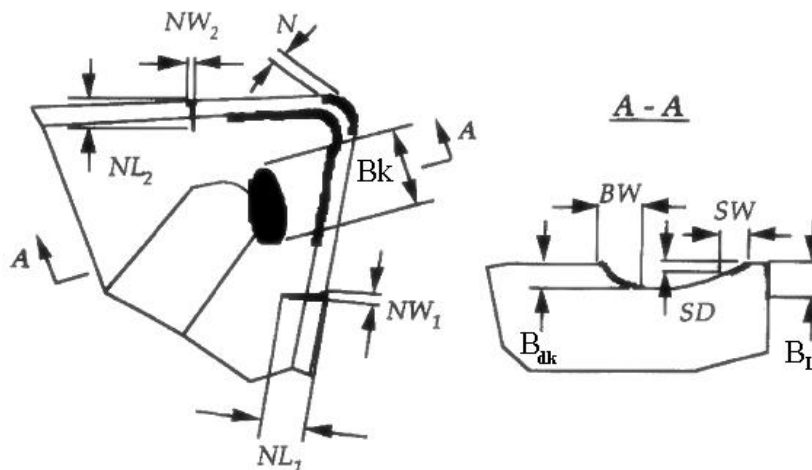
Pojava odvajanja sitnih čestica od reznog sečiva (krzanja) i naprsline usled toplote važni su pri obradi jako krutih materijala. U tom slučaju kriterijum habanja alata uzima se  $B_{Lb\max} = 0.6\text{mm}$ .

Prevremen otkaz alata je prekomerno brz, nepouzdan i nepredvidiv. Nastaje kao posledica velikih deformacija koje su izazvane postojanjem tvrdih uključaka u materijalu obratka ili usled neadekvatnih režima obrade.

Intenzivno habanje predstavlja brzo habanje reznog sečiva alata, nakon određenog perioda uspešnog rezanja, izazvano je postojanjem kratera habanja na grudnoj, širine leđnog pojasa habanja, povećanjem otpora i temperature rezanja i predstavljaju pouzdane kriterijume postojanosti alata, [32].

U praktičnim uslovima pri operaciji struganja više se koriste pločice od tvrdog metala koje na sebi imaju kanale za odvođenje strugotine, slika 22 b. Razlog za njihovo korišćenje je taj što morfologija grudne površine alata je takva da utiče na oblik strugotine tačnije na njeno odvođenje odnosno lomljenje.

Upravo zbog različite konfiguracije karbidnih pločica sa i bez žlebova razlikuju se i mesta habanja alata. Mesta habanja izmenjivih pločica od tvrdog metala sa kanalima prikazani su na slici 25.



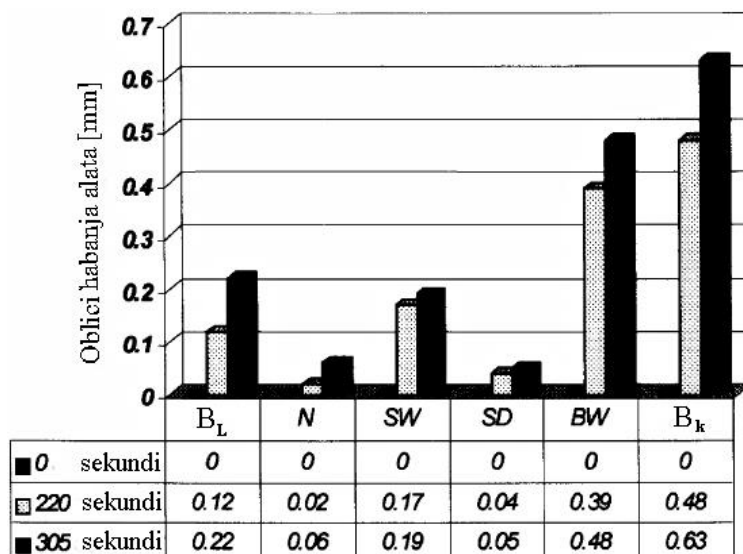
Slika 25. Mesta habanja pločica od tvrdog metala sa žlebovima. Gde su:  $NW_2$  - širina zareza habanja na pomoćnoj reznoj ivici,  $N$  - habanje vrha alata,  $NL_2$  - dužina zareza na pomoćnoj reznoj ivici,  $B_k$  - dužina kratera habanja,  $NW_1$  - širina zareza habanja na glavnoj reznoj ivici,  $NL_1$  - dužina zareza habanja na glavnoj reznoj ivici,  $B_{dk}$  - dubina kratera,  $BW$  - širina kratera habanja,  $SW$  - širina sekundarnog pojasa habanja,  $SD$  - dubina sekundarnog pojasa habanja,  $B_L$  - širina leđnog pojasa habanja, [33].

Uzimajući u obzir mesta habanja alata na pločicama od tvrdog metala sa žlebovima može se doći i do nekih novih modela razlaganja sila koje deluju na rezni klin alata što bi dovelo do boljeg predviđanja postojanosti alata koji koriste ovakav tip pločica.

Karbidna pločica sa žlebovima, zbog složenije konfiguracije, ima više oblika habanja u odnosu na ravnu pločicu. Za oba tipa pločica zajedničko je postojanje širine leđnog pojasa habanja dok se odstupanja oblika habanja javljaju na grudnoj površini alata.

Primer glavnih oblika habanja pločice sa žlebovima na grudnoj površini prikazan je na slici 26, za slučaj obrade ugljeničnog čelika sa konstantnom dubinom  $a = 1\text{mm}$ , korakom  $s = 0.22\text{mm}/o$  i brzinom rezanja  $V = 274\text{ m/min}$ . Za merenje svakog od oblika habanja korišćena je potpuno nova pločica, a period rezanja se odnosio na 220 i 305 sekundi.





Slika 26. Mesta habanja pri eksploataciji pločica od tvrdog metala sa kanalima, [34]

U navedenim uslovima obrade koristeći pločice od tvrdog metala sa žlebovima može se uzeti da je merodavan kriterijum zatupljenosti alata nakon 305 sekundi rezanja,  $B_L = 0.22\text{mm}$  (prema ISO3685 dozvoljena vrednost 0.3mm).

## 2.7 Alatni materijali sa posebnim osvrtom na tvrde metale

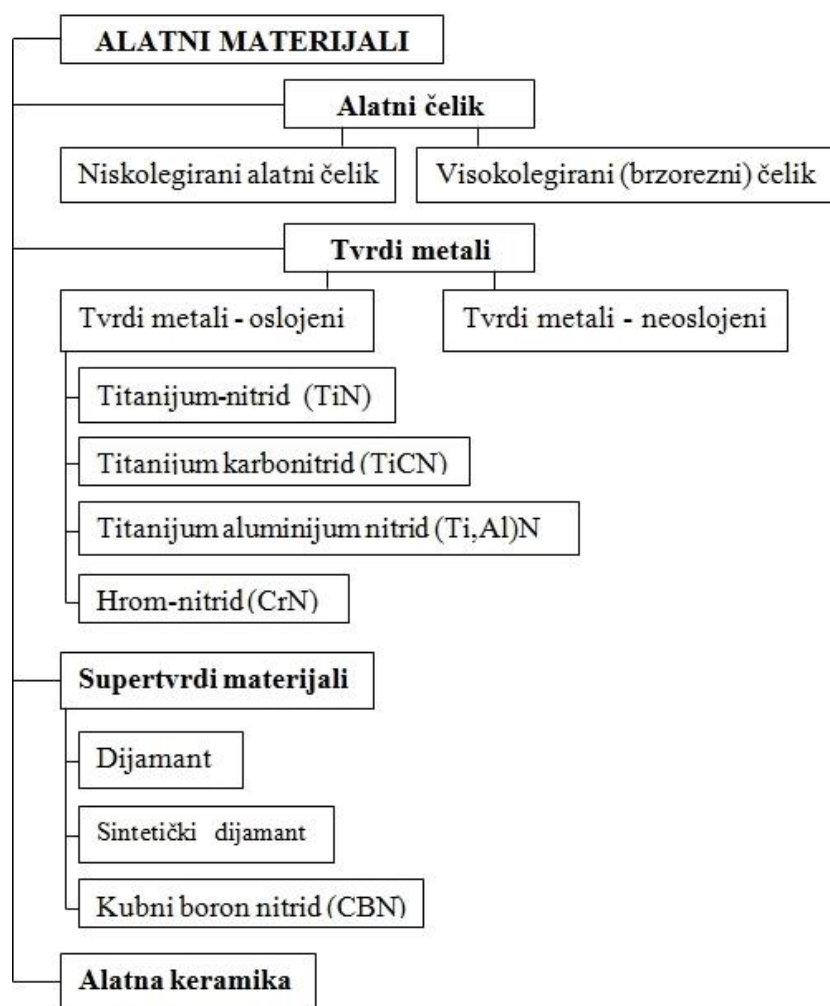
Postoji široki spektar alatnih materijala koji se koriste u industriji obrade metala. Važno je poznavati razliku između tih alatnih materijala i oblasti njihove primene, s obzirom da su izloženi: visokim temperaturama, kontaktnom opterećenju, klizanju strugotine po grudnoj površini alata, klizanju leđne površine alata i obrađene površine, cikličnom opterećenju. Rezni alat mora posedovati sledeće karakteristike:

**Tvrdoća** odnosno sposobnost da se ona zadrži pri visokim temperaturama koje se generišu u zoni rezanja.

**Žilavost** se definiše kao sposobnost materijala da apsorbuje energiju pre loma. Što je bolja žilavost materijala alata bolje podnosi udarna opterećenja, lom, vibracije i ostale karakteristike obradnog sistema. Glavni cilj u razvoju alatnih materijala jeste povećanje žilavosti i tvrdoće, [18].

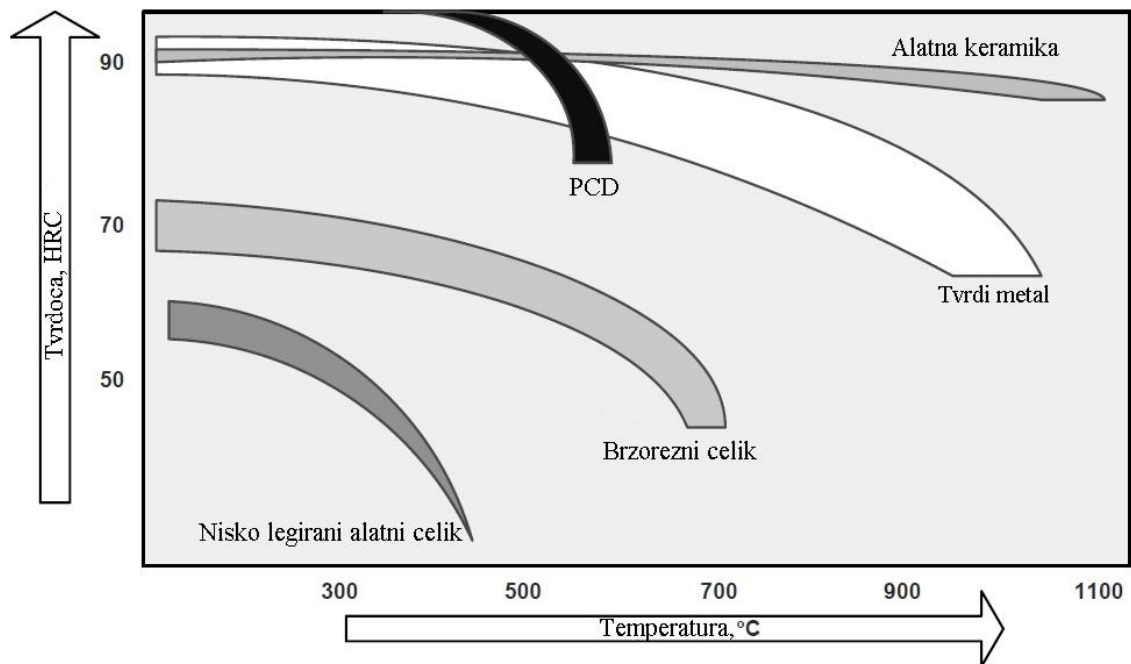
**Otpornost na habanje** u opštem slučaju definiše se kao mogućnost prihvatljive zatupljenosti alata neposredno pre njegove zamene. Otpornost na habanje nije definisana karakteristika materijala alata. Priroda habanja nije još dovoljno jasna uprkos brojnim teorijskim i praktičnim ispitivanjima. Jedan od najčešće primenjivanih eksperimenata koji određuju otpornost na habanje materijala alata jeste tribometar sa linijskim dodirom.

Različiti alatni materijali imaju različite mehaničke, fizičke i hemijske karakteristike i mogu se podeliti u nekoliko vrsta, slika 27.



Slika 27. Podela alatnih materijala

Jedna od važnijih karakteristika koju alatni materijal mora da zadovolji je sposobnost zadržavanja tvrdoće na povišenim temperaturama koje se generišu u zoni rezanja, slika 28.



Slika 28. Tvrdoća alatnih materijala u zavisnosti od temperature, [18]

Od svih alatnih materijala alatna keramika pokazuje minimalan pad tvrdoće pri porastu temperature.

### 2.7.1 Tvrdi metal

Današnji tvrdi metali uključuju titanijumske i volframove karbide kao i ostala jedinjenja metala (Ti, W, Cr, Zr, C). Karbidi poseduju dobru otpornost na habanje i minimalno menjaju tvrdoću na povišenim temperaturama. Karbidni alat sastoji se od karbidnih čestica (volfram-karbida, titana ili kombinacije volframa-titana) koji su povezani u kobaltnoj matrici sinterovanjem. Veličina karbidnih čestica manja je od  $0.8 \mu m$  za mikro zrna, od  $0.8 - 1.0 \mu m$  za fina zrna, od  $1.0 - 4.0 \mu m$  za zrna srednje veličine i preko  $4.0 \mu m$  za krupna zrna. Količina kobalta bitno utiče na karakteristike karbidnih alata (pločica). Sadržaj kobalta se kreće u rasponu 3-20% u zavisnosti od željene kombinacije volframa i tvrdoće. Pri povećanju procenta kobalta povećava se čvrstoća pločice, a smanjuje tvrdoća i žilavost. Karbidne pločice klasifikovane su u tri grupe: P, K i M koje su namenjene za obradu različitih materijala obratka.

### 2.7.2 Oslojeni tvrdi metali-prevlake

Jedna od revolucionarnih promena u industriji obrade metala rezanjem jesu oslojene karbidne pločice-prevlake. Danas 50% alata od brzoreznog čelika, 85% alata na bazi tvrdog metala i 40% alata od supertvrdih materijala proizvedeni su sa prevlakama. Prevlake u velikoj meri povećavaju postojanost alata kao i performanse pri obradi: velike produktivnosti, velikim brzinama rezanja i velikim koracima ili pri rezanju bez SHPa. Prevlake omogućuju:

- Povećanje površinske tvrdoće što dovodi do povećanja postojanosti alata,
- Povećanje otpornosti na sve vidove habanja,
- Smanjenje koeficijenta trenja između strugotine i alata,
- Smanjuje otpore rezanja,
- Smanjuje temperaturu alata.

Uobičajene prevlake koje se koriste u jednom ili više slojeva su:

- TiN (titan-nitridna) prevlaka poboljšava otpornost prema abrazivnom vidu habanja. Pločice sa ovom prevlakom imaju zlatnu boju, tvrdoća 2300 HV, koeficijent trenja 0.3, termalna stabilnost 600 °C,
- TiCN (titan-karbonitrid) prevlaka koja je namenjena za obradu čelika. Veća otpornost na habanje u poređenju sa TiN prevlakom. Pločice su sivo-ljubičaste boje, tvrdoće 3000 HV, koeficijent trenja 0.4, termalna stabilnost 750 °C,
- TiAlN i TiAlCN (titan-aluminum nitrid) prevlaka koja obezbeđuje odlične performanse za zahtevne režime rezanja. Pogodna su za obradu bez SHPa, a crno-ljubičaste je boje i tvrdoće 3500 HV, koeficijent trenja 0.45, termalna stabilnost 800-900 °C.
- CrN (hrom nitrid) prevlaka namenjena za obradu legura bakra kao što su mesing i bronza i metalik je boje [18].

### ***3. FAKTORI KOJI UTIČU NA BRZINU, INTENZITET I KARAKTER PROCESA HABANJA ALATA I POSTOJANOST***

---

Poznavanje faktora koji utiču na habanje alata od izuzetne je važnosti za modeliranje procesa rezanja i predikciju postojanosti alata. Osnovni razlog zbog čega je teško predvideti postojanost je taj što postoji previše uticajnih faktora koji se moraju uzeti u obzir. U ovom poglavlju izvršena je analiza uticajnih faktora na postojanost alata na osnovu rezultata istraživanja i dat je akcenat na još neke faktore čiji će uticaj biti proveren u eksperimentalnom delu ovog rada. Suština ovog poglavlja leži u analizi osetljivosti uticajnih faktora na postojanost kao i njihovo rangiranje što će poslužiti za jasno definisanje matematičkog modela.

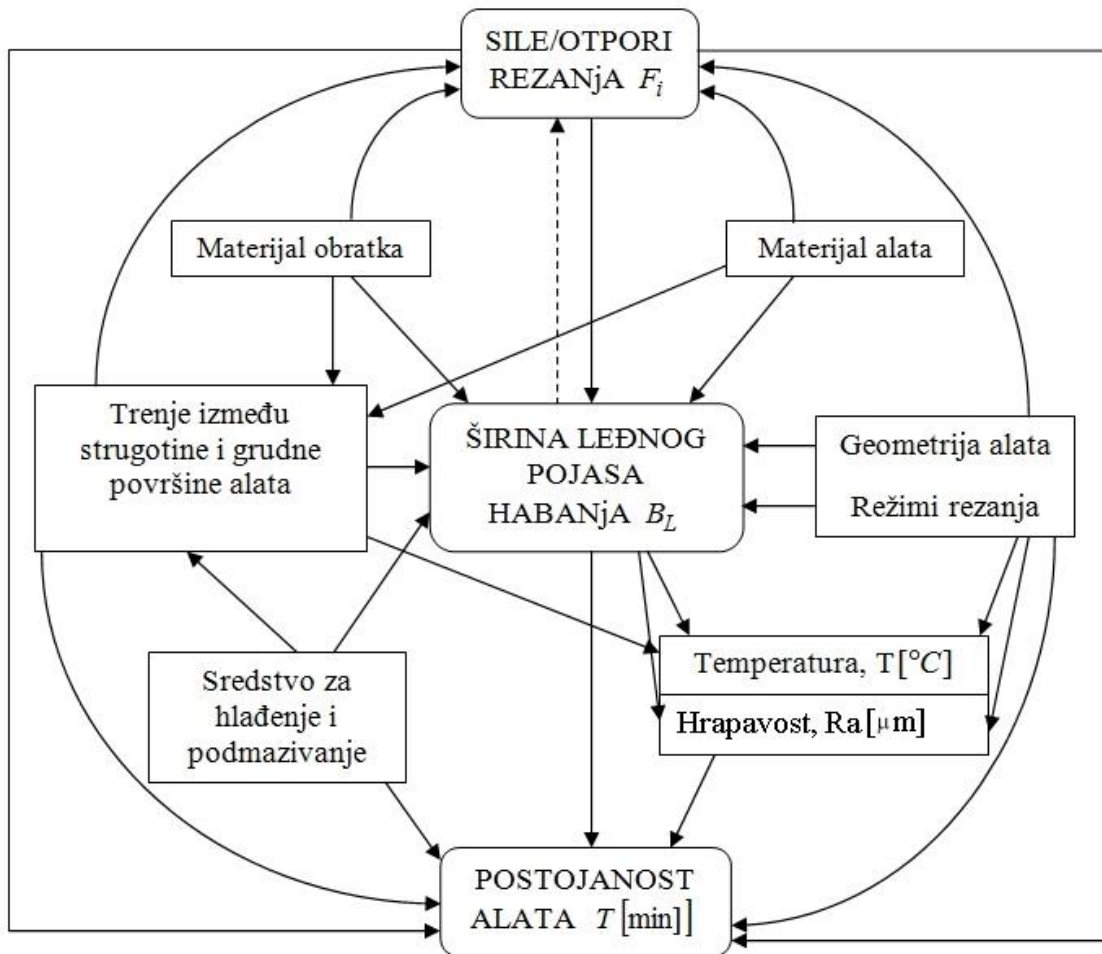
Kod habanja reznog alata, koje nastaje u procesu rezanja, prisutni su svi vidovi habanja: abrazivno, atheziono, difuzno, hemijsko i oksidaciono. U literaturi obično se navode sledeći faktori koji utiču na brzinu, intenzitet i karakter procesa habanja alata, [29]:

- materijal obratka,
- materijal alata,
- brzina rezanja,
- korak,
- dubina rezanja,
- statička krutost sistema,
- dinamičko ponašanje sistema,
- vrsta sredstva za hlađenje i podmazivanje.

U zavisnosti od toga, koji su uticajni faktori dominantni, mogu nastati sledeći slučajevi habanja alata: intenzivno habanje leđne i slabo habanje grudne površine, slabo habanje leđne i intenzivno habanje grudne površine, približno isto habanje grudne i leđne površine i zaobljenje sečiva alata.

Uzimajući u obzir istraživanja u ovoj oblasti uticajni faktori mogu se praktično podeliti u tri grupe: uticajni faktori na širinu leđnog pojasa habanja alata, uticajni faktori na

otpore rezanja i uticajni faktori na postojanost alata, slika 29. Kompleksnost uticajnih parametara je velika i uočava se velika povezanost sve tri grupe.



Slika 29. Uticajni faktori na habanje i postojanost alata

Sa slike 28 može se videti da **na postojanost alata utiču**: sile-otpore rezanja, geometrija alata, režimi rezanja, širina leđnog pojasa habanja, koeficijent trenja između strugotine i grudne površine alata, sredstvo za hlađenje i podmazivanje.

Na širinu leđnog pojasa habanja, kao jednog od dominantnih oblika habanja, utiču: geometrija alata, režimi rezanja, sredstvo za hlađenje i podmazivanje.

U stručnoj literaturi nije posvećeno dovoljno pažnje koeficijentu trenja između leđne površine alata i obrađene površine uzimajući u obzir da isti uzrokuje porast otpora rezanja i da utiče na postojanost alata. U ovom radu posebna pažnja biće posvećena trenju između leđne površine alata i obrađene površine u smislu njegove integracije u

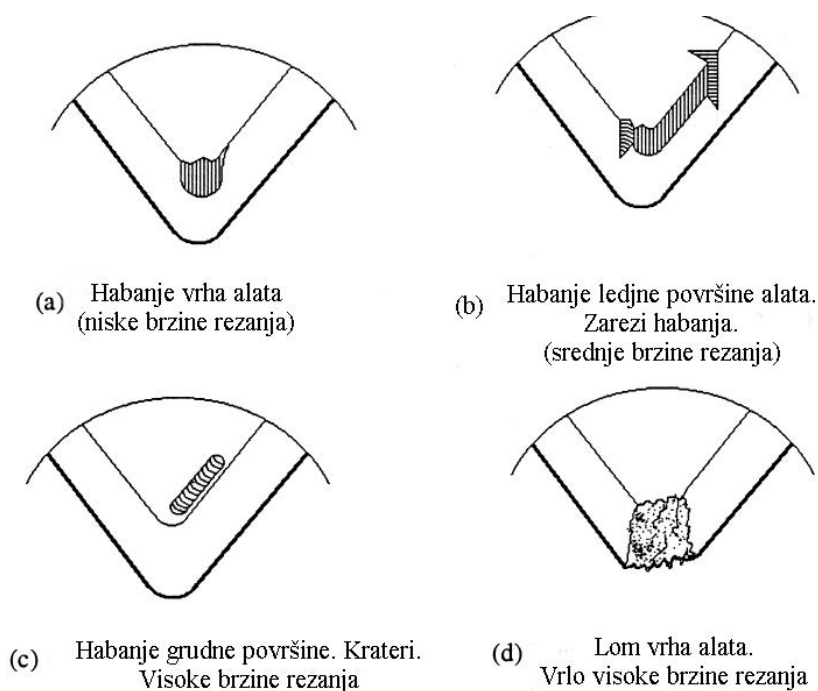
matematički model rezanja i proveru kroz eksperimentalni deo rada, a sve u cilju što tačnijeg predviđanja postojanosti alata.

### 3.1 Faktori koji utiču na širinu pojasa habanja na leđnoj površini alata

#### 3.1.1 Uticaj režima rezanja na širinu leđnog pojasa habanja alata

BRZINA REZANJA,  $V$  [ $m/min$ ]

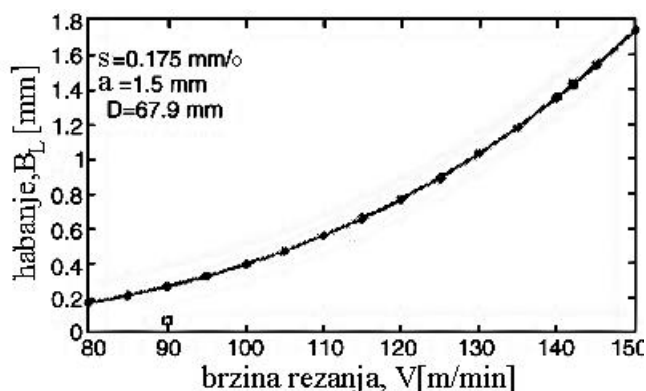
Pri nižim brzinama rezanja alat se haba tako što se zaobljava vrh, a potom dolazi do zatupljenja, slika 30 a). Kada se povećava brzina rezanja menja se mesto habanja, a može doći i do plastičnih deformacija vrha alata, u slučaju alata od brzoreznog čelika. Pri srednjim brzinama rezanja dolazi do habanja leđne površine alata (širina leđnog pojasa habanja alata), slika 30 b). Pri visokim brzinama rezanja dolazi pojave kratera habanja alata (na grudnoj površini) koji je nastao više zbog temperature koja je posledica trenja između strugotine i grudne površine alata, slika 30 c).



Slika 30. Mesta habanja alata pri različitim brzinama rezanja pri ortogonalnom rezanju

Pri izuzetno visokim brzinama rezanja dolazi do plastičnih deformacija reznog sečiva koja rezultira lomom vrha alata, slika 30 d).

Pri obradi čelika za poboljšanje (č1531; C45) alatom CTPG (P20) pri povećanju brzine rezanja dolazi do povećanja širine leđnog pojasa habanja  $B_L$ , slika 31.



Slika 31. Zavisnost širine leđnog pojasa habanja i brzine rezanja

Sa slike 31 može se videti eksponencijalna zavisnost između brzine rezanja i širine leđnog pojasa habanja što ukazuje na to da je brzina rezanja važan faktor.

Pored toga što brzina rezanja utiče direktno na širinu leđnog pojasa habanja, kao jednog od dominantnih oblika habanja, postavlja se pitanje šta se dešava sa mehanizmima habanja pri različitim vrednostima brzine rezanja.

U tabeli 5 je dat hemijski sastav obrađivanih materijala (245-320 BH) sa alatom (P20 CNMG120412 oslojenim TiN i grudnim uglom  $\gamma = 5^\circ$ ).

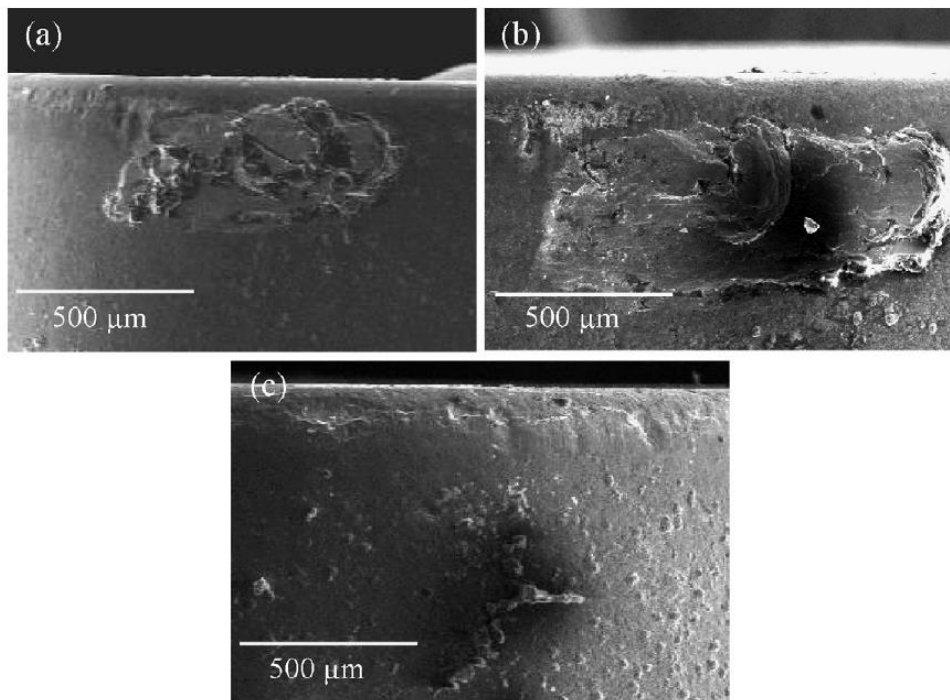
Tabela 5. Hemijski sastav materijala obratka

Materijal obratka	Hemijski sastav %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	N	Ti
č1531	0.43	0.3	0.78	0.035	0.035	0.38	0.12	0.06	-	-	-
č4131	0.42	0.29	0.7	0.04	0.01	0.98	0.19	0.07	-	-	-
30MnVS6	0.3	0.59	1.61	0.072	0.072	0.1	0.008	0.09	-	0.015	0.015

Elementi režima obrade su: korak  $s = [0.11; 0.22; 0.44] \text{ mm/o}$ , brzina rezanja kreće se u dijapazonu od  $V = 10 - 250 \text{ m/min}$ . Obrada se vrši na CNC strugu.

Pri nižim brzinama rezanja  $V = 10 - 50 \text{ m/min}$ , glavna oštećenja reznog sečiva alata izazvana su athezivnim mehanizmom habanja, a izgled leđne površine alata pri obradi pomenutih materijala prikazan je na slici 32.

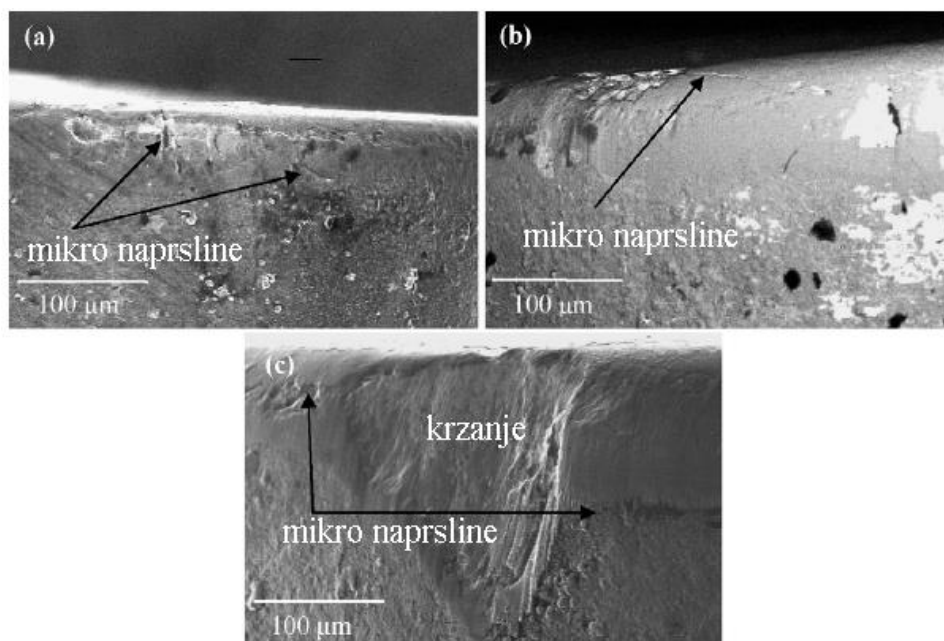




Slika 32. Naslage materijala na leđnoj površini alata pri operaciji struganja: a) č1531, b) č 4130, c) 30MnVS6 ( $V = 30\text{ m/min}$ ,  $s = 0.11\text{ mm/o}$ )

Sa slike 32 može se videti da su naslage na leđnoj površini alata veće kada je materijal obratka čelik za poboljšanje (sl.31 a) i b) u poređenju sa materijalom obratka 30MnVS6. Formiranje naslaga nastaje usled metalurške reakcije između materijala alata i obratka u toku procesa obrade. Debljina naslage, koja je rezultat male brzine rezanja i male vrednosti faktora sabijanja strugotine, stabilna je pri manjim brzinama rezanja. Istraživači Mills i Sun imali su teoriju da se naslage na leđnoj površini alata mogu ponašati kao zaštitni sloj na materijalu alata i da mogu uticati na povećanje postojanosti alata ukoliko je u pitanju stabilna naslaga formirana mehanizmom athezije, [5].

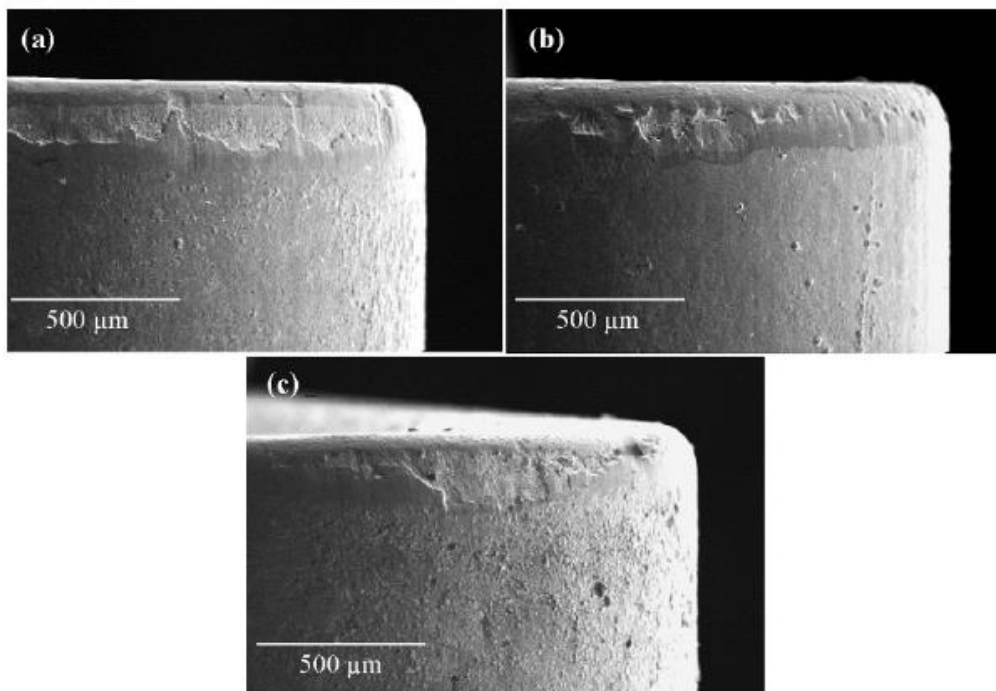
Pri velikim brzinama rezanja  $V = 100 - 250\text{ m/min}$ , zbog velikih otpora rezanja i temperature u zoni rezanja, mehanizam habanja je znatno komplikovaniji. Povećanje brzine rezanja izaziva smanjenje intenziteta athezionog mehanizma habanja i postojanost alata. S toga, otpori rezanja postaju dovoljno veliki da naslaga na površini alata postane nestabilna za razliku od malih brzina rezanja gde je stabilna. Kao posledica povećane temperature dolazi do pojave difuznog mehanizma habanja i termičkih naprslina na reznom delu alata nastale usled zamora materijala, slika 33.



Slika 33. Mikro naprsline na leđnoj površini alata pri zahvatu struganja: a) 30MnVS6 b) č1531, b) č 4130 ( $V = 200 \text{ m/min}$ ,  $s = 0.11 \text{ mm/o}$  nakon 7 minuta rezanja), [5]

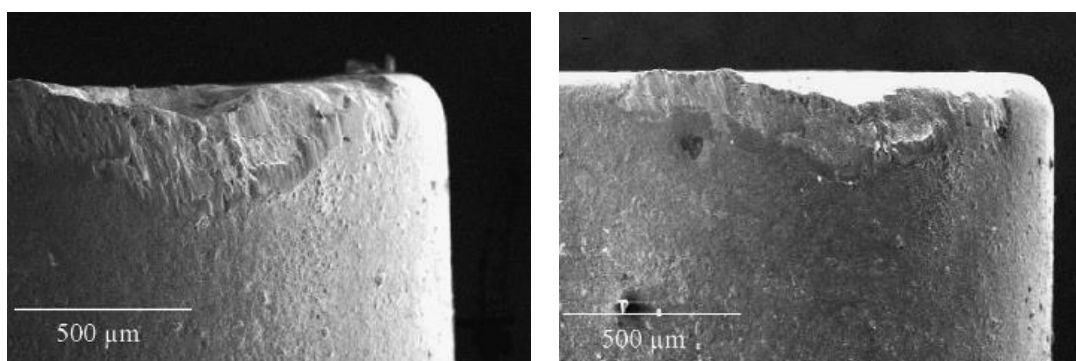
Mirko prsline nastale su kao posledica cikličnog širenja i skupljanja površinskih slojeva materijala alata. Usled temperature koja se razvije pri rezanju, sloj se širi, a pri hlađenju, koje se odvija provođenjem toplote na telo alata, skuplja se.

Na slici 34 prikazane su leđne površine alata pri operaciji struganja pri režimima rezanja:  $V = 100 \text{ m/min}$ ,  $s = 0.22 \text{ mm/o}$ ,  $\gamma = 5^\circ$ ,  $t = 9 \text{ min}$ . Leđne površine alata pri obradi tri tipa čelika pokazuju prisustvo habanja kao i mirko krzanja, a istraživanja pokazuju da je dužina leđnog pojasa habanja veća pri obradi čelika č1530 i č4130 u poređenju sa 30MnVS6.



Slika 34. Izgled leđne površine alata pri struganju: a) č1531, b) č4130, c) 30MnVS6  
 ( $V = 100 \text{ m/min}$ ,  $s = 0.22 \text{ mm/o}$ ,  $\gamma = 5^\circ$ ,  $t = 9 \text{ min}$ ), [5]

Krzanje i lom alata, pri obradi navedenih čelika, nastali su pri sledećim režimima :  
 $V = 150 \text{ m/min}$ ,  $s = 0.44 \text{ mm/o}$ , slika 35, uz naglasak da su krzanje i lom alata više  
 izraženi kod čelika č1530 i č4130 u odnosu na 30MnVS6.



Slika 35. Lom alata, pri obradi č1531 i č4130 ( $V = 150 \text{ m/min}$ ,  $s = 0.44 \text{ mm/o}$ ), [5]

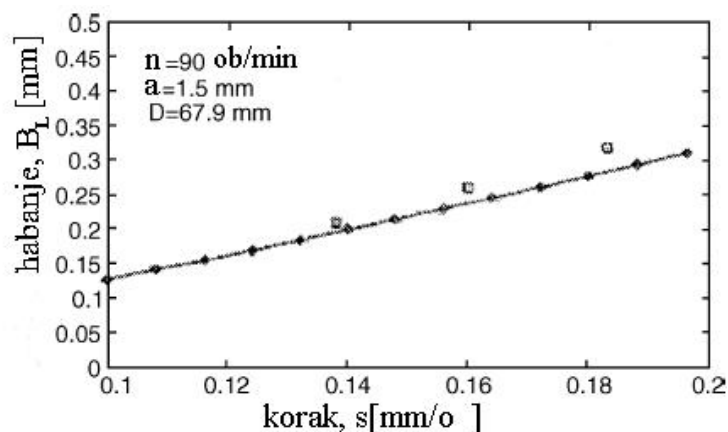
Reakcija između metalurških i mehaničkih karakteristika uslovljava različitu  
 obradljivost pomenutih tipova materijala obratka. Prema kriterijumu habanja, širini

leđnog pojasa habanja  $B_L$ , prvo se zatupi alat koji obrađuje č4130 zatim č1530 i na kraju 30MnVS6.

Na osnovu brojnih eksperimenata ( za različite vrednosti brzina rezanja, koraka i merenja postojanosti alata i širine leđnog pojasa habanja) može se ustanoviti optimalan režim rezanja pri kojem se obezbeđuje maksimalno iskorišćenje alata. Optimalan režim za obradu sve tri vrste materijala obratka: brzina rezanja  $V = 100 \text{ m/min}$ , korak  $s = 0.11 \text{ mm/o}$ , dubina rezanja  $a = 1 \text{ mm}$  što obezbeđuje: postojanost alata od 30 min za čelike č1531 i č4130 i postojanost alata od 37min pri obradi 30MnVS6.

KORAK ,  $s$  [mm/o]

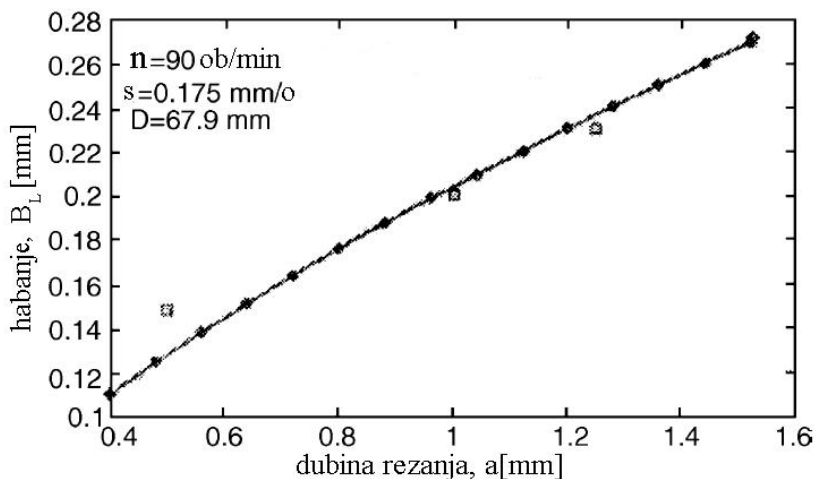
Pri obradi čelika za poboljšanje (č1531; C45) alatom CTPG (P20) pri povećanju koraka dolazi do linearnog povećanja širine leđnog pojasa habanja  $B_L$  (slika 36), odnosno smanjenja postojanosti alata.



Slika 36. Zavisnost koraka i širine leđnog pojasa habanja

DUBINA REZANJA,  $a$  [mm]

Pri obradi čelika za poboljšanje (č1531 odnosno C45) alatom CTPG pri povećanju dubine rezanja dolazi do povećanja širine leđnog pojasa habanja  $B_L$ , slika 37.



Slika 37. Zavisnost širine lednog pojasa habanja i dubine rezanja

Poređenjem slika 36 i 37 zaključuje se da korak ima veći uticaj na širinu lednog pojasa habanja od dubine rezanja.

Na osnovu navedenog zaključuje se da je uticaj režima rezanja na širinu lednog pojasa habanja, prema stepenu uticajnosti, sledeći:

1. Brzina rezanja,  $V$  [ $m/min$ ],
2. Korak,  $s$  [ $mm/o$ ],
3. Dubina rezanja,  $a$  [ $mm$ ].

### 3.1.2 Uticaj materijala obratka na habanje ledne površine alata

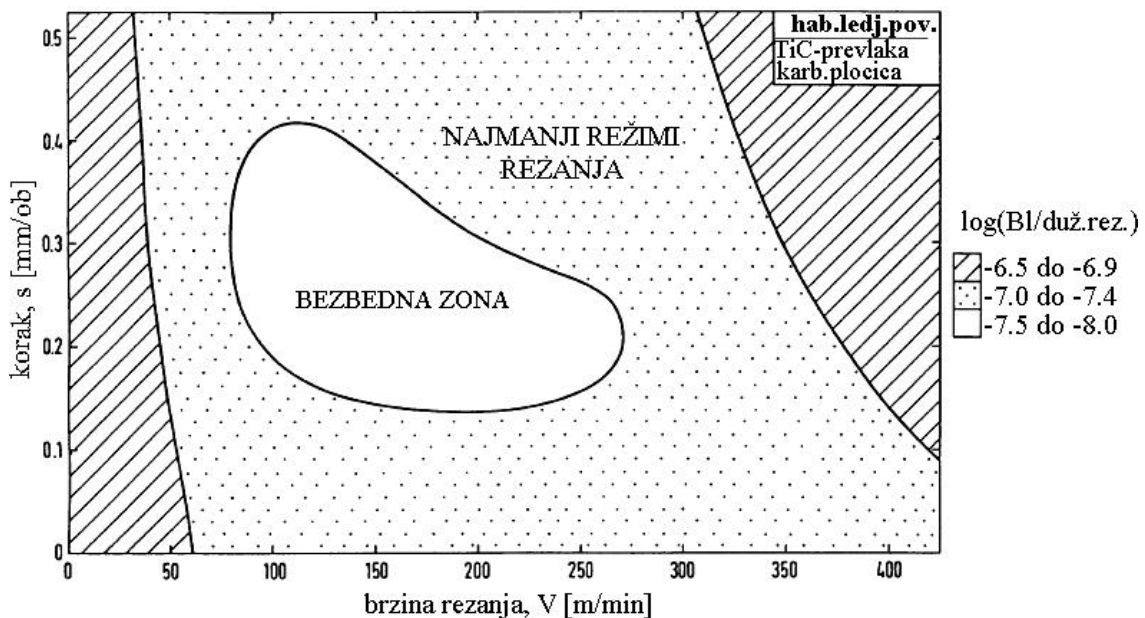
Na habanje alata i njihov karakter ima uticaj i fizičko-mehanička svojstva obrađivanog materijala. Viskozniji materijali intenzivnije habaju grudnu površinu alata u odnosu na lednu, dok kruti materijali više habaju lednu površinu. Strugotina pri obradi elastičnih materijala izaziva znatan rad trenja po grudnoj površini alata dok za razliku od krutih materijala gde je taj rad neznatan. Pri obradi materijala velike čvrstoće nastaju velika naprezanja i temperature u zoni rezanja, a kao posledica toga i intenzivnije habanje alata, [20].

Bolje razumevanje uticaja materijala obratka na habanje ledne površine alata poslužiće mape habanja. Ovakve mape opisuju, na grafički način, promenu intenziteta habanja alata i mehanizama habanja u funkciji širokog spektra elemenata režima rezanja. Mape

habanja pokazuju ‘bezbednu zonu’ u kojoj je stopa habanja najmanja kao i njoj pripadajuće moguće režime rezanja.

Autori koji su ispitivali habanje alata od tvrdog metala sa TiC prevlakom (ISO SNMN 120408-Sumimoto), pri obradi čelika Č1530 (190 BN) i AISI 4340 (235 BN) bez primene shp i konstantnoj dubini rezanja.

Mapa habanja za svaki materijal definisana je pomoću: brzine rezanja, koraka kao i stope habanja alata tako da svaka tačka na grafiku predstavlja jedinstven režim koji je u vezi sa eksperimentalno izmerenom vrednošću stope habanja alata koja se može definisati kao odnos između širine leđnog pojasa habanja i dužine rezanja (odnosno  $\log_{10}(B_L / \text{dužina rezanja})$ ). Izgled mape habanja pri obradi čelika 1531 dat je na slici 38.



Slika 38. Mapa habanja alata pri obradi čelika č1531, [34]

Oblast sa najnižim intenzitetom habanja ima vrednosti manje od -7.5 i predstavlja bezbednu zonu, oblast najmanjih režima rezanja ima vrednosti stope habanja od -7.0 do -7.4 i na kraju oblast velike stope habanja ima vrednosti koje su veće od -6.9. Zanimljivo je da su mape habanja skoro identične i za čelik AISI 4340 što znači da ih nije potrebno definisati za svaki materijal obratka. Oblast bezbedne zone rezanja sugeriše na mogućnost odabira režima rezanja koji će postići kompromis između proizvodnosti i habanja alata, [35, 36, 37, 38].

### 3.1.3 Uticaj materijala alata na habanje ledne površine

Materijal alata mora da bude otporan na habanje i ne sme da reaguje sa materijalom obratka u toku procesa obrade. Prema podeli alatni materijali se habaju respektivno: niskolegirani alatni čelik, visokolegirani alatni čelik, neoslojeni karbidi, livene kobaltne legure, oslojeni karbidi, alatna keramika i supertvrđi materijali. Pomenuti alatni materijali imaju skoro identične maksimalne dozvoljene vrednosti širine leđnog pojasa habanja, tabela 6.

Tabela 6. Preporuke za maksimalne širine leđnog pojasa habanja, [18]

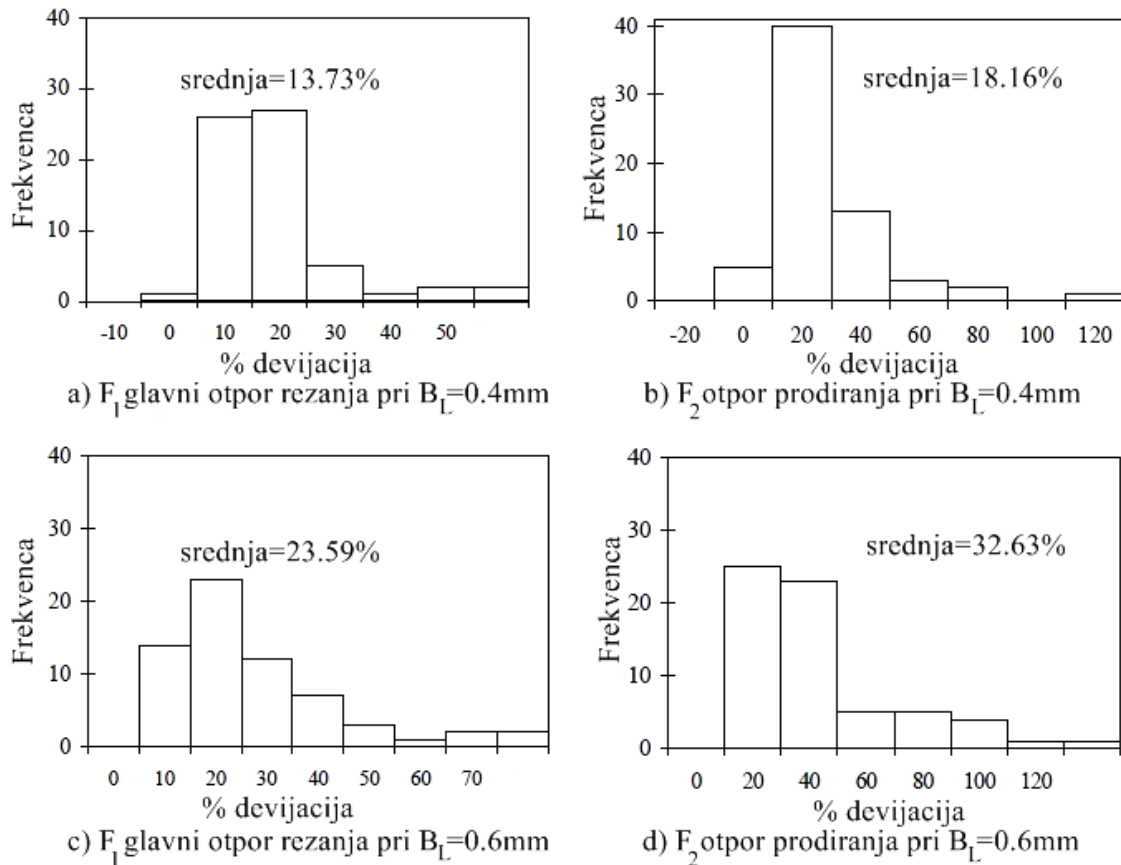
Materijal alata		Brzorezni čelik	Cementirani karbid	Oslojeni karbid	Keramika $Al_2O_3$	Keramika $Si_3N_4$
operacija	(mm)					
Gruba ob.	$B_L$	0.35-1.0	0.3-0.5	0.3-0.5	0.25-0.3	0.25-0.5
Završna ob.	$B_L$	0.2-0.3	0.1-0.25	0.1-0.25	0.1-0.2	0.1-0.2

### 3.1.4 Uticaj otpora rezanja na širinu leđnog pojasa habanja alata

Promena otpora rezanja u direktnoj je vezi sa habanjem alata. Otpori rezanja su veoma uticajni na postojanost alata, odnosno povezani sa habanjem alata. Postoji razlika u otporu rezanja između oštrog i pohabanog alata. Eksperimentalno je pokazano da komponente otpora rezanja različito reaguju na mesta habanja alata. Varijacije otpora pomoćnog kretanja  $F_3$  i otpora prodiranja  $F_2$  uticajniji su na habanje alata u poređenju sa glavnim otporom rezanja  $F_1$ . Na varijaciju otpora  $F_2$  veoma utiče širina pojasa habanja alata na leđnoj površini [4].

Da je otpor prodiranja uticajniji od glavnog otpora rezanja na habanje alata na leđnoj površini potvrđuju istraživanja obrade Č1531 (130 BN) alatom od tvrdog metala P20 koji je oslojen TiC ( $V [50 - 200 m/min]$ ,  $s [0.1 - 0.3 mm/o]$ ,  $\gamma [-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 8^\circ]$ )

Sprovedeni su eksperimenti za svaku kombinaciju režima rezanja i poređeni su: glavni otpor rezanja i otpor prodiranja za slučaj kada je alat oštar i kada je zatupljen odnosno za dve vrednosti širine leđnog pojasa habanja  $B_L = 0.4 mm$  i  $B_L = 0.6 mm$ . Na slici 39 prikazana je statistička obrada dobijenih rezultata.



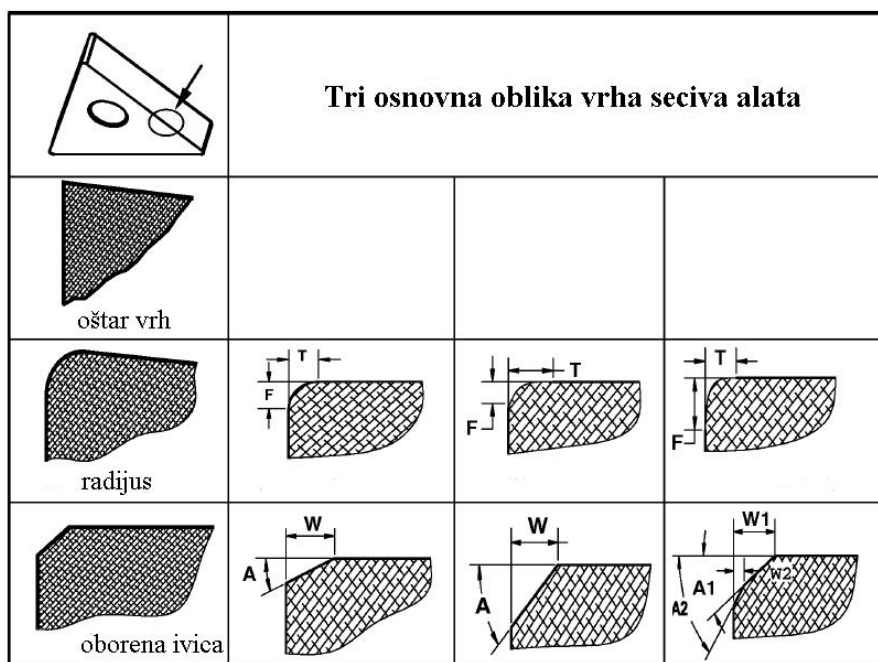
Slika 39. Devijacije otpora rezanja pri rezanju: a), b) oštrom alatom, c), d) pohabanim alatom, [21]

Zaključuje se da je prosečna devijacija 13.7% za oštar i 23.6% za tup alat. Otpor prodiranja ima devijaciju od 32.6% u slučaju tupog alata što je za 9.04% više u odnosu na devijaciju glavnog otpora rezanja što znači da je otpor prodiranja znatno uticajnije na promenu širine pojasa pojava habanja na leđnoj površini u odnosu na glavni otpor rezanja i da se može koristiti za razvijanje koncepta praćenja habanja alata, [21].

### 3.1.5 Uticaj radijusa vrha alata na habanje leđne površine

Povećanje postojanosti alata može se postići različitim načinima prelaza sa glavnog na pomoćno režno sečivo, kao što je prikazano na slici 40. Razlog zbog čega se pravi prelaz glavnog i pomoćnog reznog sečiva jeste ojačanje i povećanje dužine kontakta sa obratkom. Na slici 40 prikazani su najčešći oblici vrha sečiva alata (oštar vrh, radijus i ravan prelaz).





Slika 40. Oblici vrha sečiva alata-pločice, [36]

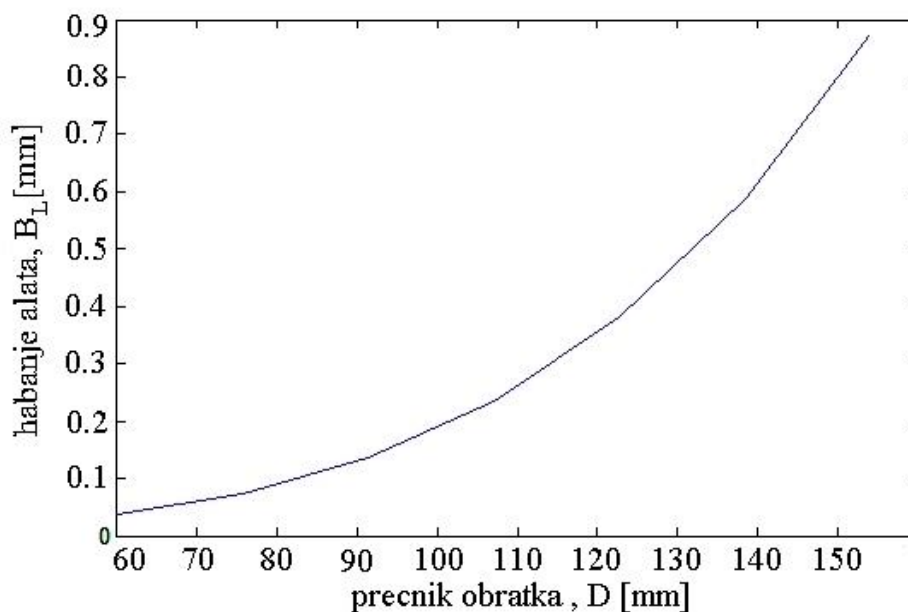
Radijus vrha alata može smanjiti pojavu koncentrisanog habanja i obično se koristi pri završnoj obradi. Oborena ivica koristi se za zahvate grube obrade i prekidnog rezanja. Dizajn vrha sečiva alata utiče na: oblik zone deformisanja, distribuciju temperature i napona na grudnoj površini alata i na otpore rezanja.

Pri povećanju radijusa vrha sečiva povećava se srednje aritmetičko odstupanje profila (kvalitet obrađene površine) i otpora rezanja. Eksperimentalna istraživanja pokazuju da ravan prelaz alata ima uticaja na otpor rezanja, pogotovo dužina prelaza. Promenom ugla nagiba oborene ivice vrha alata ima veći uticaj na otpor prodiranja, pa samim tim i na širinu leđnog pojasa habanja, u odnosu na glavni otpor rezanja. Pri povećanju oborene ivice sa  $15^\circ$  na  $25^\circ$  otpor prodiranja povećao se za 30% dok je povećanje glavnog otpora rezanja na nivou od 10%, [36, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45], dok je uobičajena dužina oborene rezne ivice 0.1 ili 0.2mm.

Eksperimentalnim putem pokazano je da pri obradi čelika tvrdoće 35 HRc neoslojenom karbidnom pločicom P20, bez sredstva za hlađenje i podmazivanje optimalna vrednost oborene ivice vrha alata iznosi  $-15^\circ$ .

### 3.1.6 Uticaj prečnika obratka na širinu leđnog pojasa habanja

Na širinu leđnog pojasa habanja pored koraka i dubine rezanja uticaj ima i prečnik obratka. Uspostavljen je matematički model koji definiše širinu leđnog pojasa habanja u funkciji: broja obrtaja obratka, koraka, dubine rezanja i prečnika obratka. Model je proveren pri obradi čelika za poboljšanje (č1531; C45) alatom CTPG (P20), a dobijena zavisnost prikazana je na slici 41.



Slika 41. Zavisnost širine leđnog pojasa habanja u funkciji prečnika obratka.

$$(s = 0.1 \text{ mm/ob}, a = 0.9 \text{ mm}, n = 90 \text{ o/min})$$

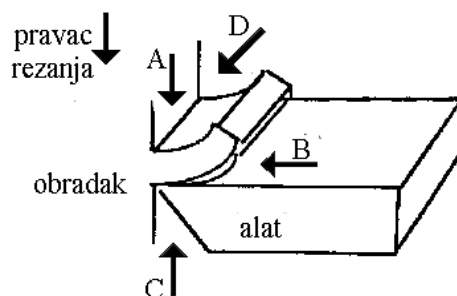
Sa slike 41 može se uočiti da se povećanjem prečnika obratka eksponencijalno povećava širina leđnog pojasa habanja. To podrazumeva da se za određeni prečnik obrade i režime rezanja može predvideti dozvoljena širina leđnog pojasa habanja.

### 3.1.7 Uticaj sredstva za hlađenje i podmazivanje na leđni pojas habanja

Uobičajeno je da se pri procesu obrade koristi sredstvo za hlađenje i podmazivanje u cilju smanjenja habanja i odvođenja toplote nastale u zoni rezanja. Postavlja se pitanje na koji način mazivo deluje na habanje leđne površine alata i da li utiče na povećanje ili smanjenje postojanosti alata.

Sredstvo za hlađenje i podmazivanje (SHP) apsorbuje i odnosi deo generisane toplote u zoni rezanja. SHP u vidu podmazivanja uljnom maglom daje bolje rezultate u poređenju sa konvencionalnim načinima podmazivanja.

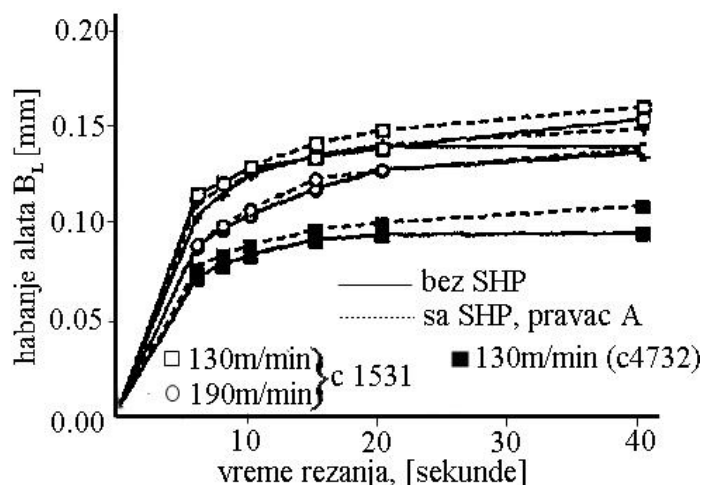
Postoje četiri načina dovođenja shp u zonu rezanja, slika 42.



Slika 42. Mogući pravac primene sredstva za hlađenje i podmazivanje

Tejlor je dokazao da se habanje alata ne smanjuje kada se mazivo usmeri u pravcu A tj. na zadnji deo strugotine. Lauterbach je pokazao da primena pravca lubrikanta u smeru C najefikasnija i utiče na povećanje postojanosti alata.

Rezultati istraživanja obrade čelika č1530 i č4732 alatom sa pločicom CNMG proizvođača Sandwik ( $\alpha = 5^\circ$ ,  $\kappa = 15^\circ$ ,  $r = 0.8\text{mm}$ ) bez i sa primenom sredstva za hlađenje i podmazivanje Blasocut 2000 Universal (snaga pumpe za SHP oko 3 hp, protok  $2.5\text{l/min}$ , prečnik mlaznice iznosi  $8\text{mm}$ ) prikazani su na slici 43.



Slika 43. Zavisnost širine leđnog pojasa habanja i vremena rezanja (sa i bez SHP), obradni sistem strug (Colchester Mascot 1600), ( $V = 130 - 190\text{m/min}$ ,  $a = 2\text{mm}$ ,  $s = 0.2\text{mm/o}$ ) [46]

Pri obradi čelika č 1531 i č 4732 uočava se veći porast širine leđnog pojasa habanja, kada se koristi sredstvo za hlađenje i podmazivanje, nego bez lubrikanta i to u periodu od 0 – 40 sekundi. Nakon perioda rezanja od 40 sekundi uočava se ujednačen porast širine leđnog pojasa habanja sa ili bez SHP-a. Navedena istraživanja pokazuju da, uprkos popularnom verovanju, primena lubrikanta ne smanjuje uvek habanje alata. Što se tiče kratera habanja uočava se njegovo pomeranje ka vrhu alata, što je nepovoljno, i to u slučaju korišćenja SHP-a, [46].

## 3.2 Faktori koji utiču na otpore rezanja

### 3.2.1 Uticaj geometrije alata na otpore rezanja

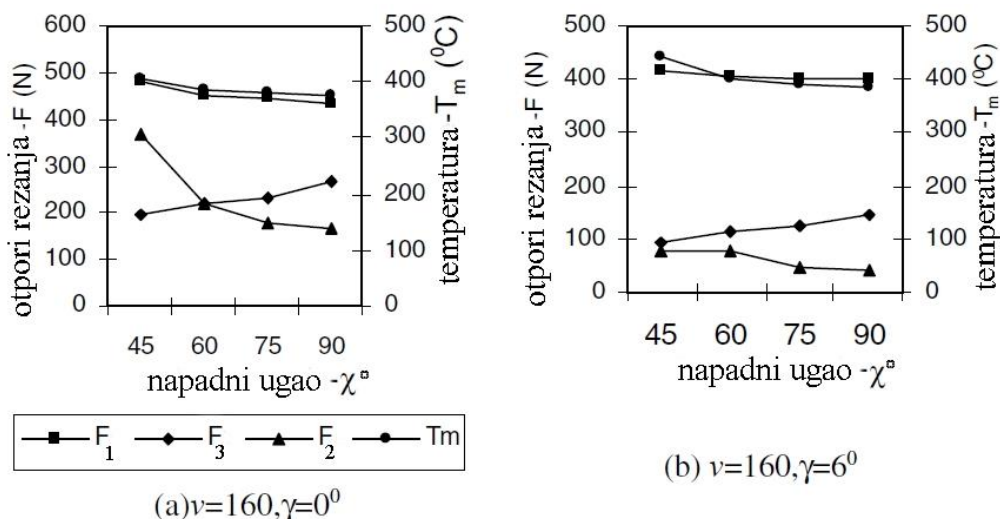
Geometrija alata ima veliki uticaj na:

- Kontrolu strugotine – geometrija alata određuje pravac i način odvođenja strugotine iz zone rezanja.
- Produktivnost – količina skinutog materijala u jedinici vremena je povezana sa korakom koji se može povećati optimalnim izborom geometrije alata.
- Postojanost alata – geometrija alata direktno utiče na postojanost zbog toga što definiše veličinu i pravac otpora rezanja, brzinu klizanja između grudne površine alata i strugotine i dr.
- Na pravac i veličinu otpora rezanja utiču sledeći elementni geometrije alata: uglovi  $\alpha, \gamma, \lambda, \kappa$ .

NAPADNI UGAO,  $\kappa$ [°]

Napadni ugao značajno utiče na otpore rezanja i postojanost alata. Pri smanjenju napadnog ugla dolazi do povećanja širine strugotine (razlog je povećanje ukupne dužine sečiva). Ovakvi uslovi rezanja omogućuju poboljšano odvođenje toplote iz zone rezanja što ima za posledicu povećanje postojanosti alata, [18]. Pri zahvatu grubog struganja ugljeničnog čelika pri promeni napadnog ugla sa 45° na 30° dovodi do petostrukog

povećanja postojanosti alata. Pri povećanju napadnog ugla noža skoro da se ne menja vrednost komponente glavnog otpora rezanja, otpor prodiranja se smanjuje, a otpor pomoćnog kretanja povećava, slika 44, [47]. Smanjenje napadnog ugla ima svoje nedostatke kao što su: povećanje otpora prodiranja, što smanjuje tačnost i stabilnost obrade. Optimalna vrednost napadnog ugla  $\kappa = 60^\circ - 70^\circ$ .

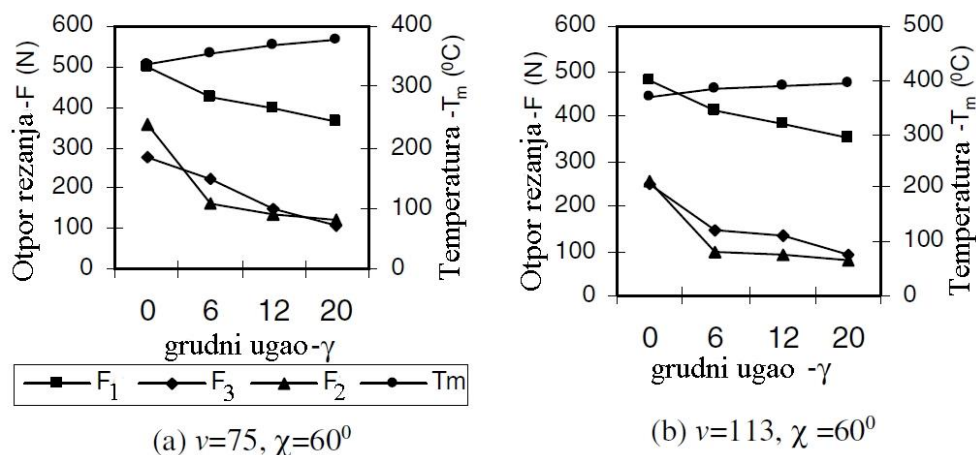


Slika 44. Zavisnost otpora rezanja i temperature u funkciji napadnog ugla. Brzina rezanja  $V$  izražena je u [m/min]

#### GRUDNI UGAO, $\gamma$ [°]

Grudni ugao ima veliki uticaj na sve komponente otpora rezanja i na temperaturu vrha alata. Povećanje grudnog ugla smanjuje snagu rezanja po jediničnoj zapremini skinutog sloja materijala i to za 1% za svaki stepen povećanja grudnog ugla počevši od  $\gamma = -20^\circ$ . Na osnovu ovoga moglo bi se zaključiti da je ispravno uvek odabrati alat sa velikim grudnim uglom, ali treba imati u vidu da pri tome dolazi do slabljenja reznog klina alata. Kada je grudni ugao pozitivan, normalna sila na grudnoj površini alata izaziva savijanje vrha alata. Prisustvo savijanja značajno smanjuje čvrstoću reznog sečiva. Zona kontakta alat-strugotina smanjuje se sa grudnim uglom tako da napadna tačka normalne sile pomera se bliže reznom sečivu. Kada je grudni ugao negativan normalna sila izaziva sabijanje materijala alata. Zato što materijali alata imaju veliku čvrstoću na sabijanje, čvrstoća reznog sečiva je još veća kada je grudni ugao negativan. Na slici 45 su prikazani rezultati istraživanja pri obradi čelika č1531 (40HRc) na CNC strugu sa alatom od tvrdog metala (Komet WCMT 040303 FR ES P25M) sa aspekta

promene komponenta otpora rezanja i temperature rezanja u funkciji grudnog ugla i brzine rezanja.



Slika 45. Zavisnost komponenta otpora rezanja i temperature rezanja u funkciji grudnog ugla i brzine rezanja za konstantu vrednost napadnog ugla [48]. Brzina rezanja  $V$  izražena je u [m/min]

Sa slike 45 može se uočiti da u procesu rezanja sa napadnim uglom  $\kappa=60^\circ$  sa povećanjem grudnog ugla (pozitivnog) dolazi do smanjenja komponenta otpora rezanja zbog toga što alat lako prodire u materijal, međutim dolazi do porasta temperature rezanja zbog povećane kontaktne površine strugotine sa alatom.

Pozitivan grudni ugao daje veći ugao smicanja što dovodi do smanjenja otpora rezanja. Alat sa pozitivnim grudnim uglom obezbeđuje bolji kvalitet obrađene površine pošto potpomaže boljem odvođenju strugotine iz zone rezanja. Optimalna vrednost grudnog ugla iznosi  $\gamma=12^\circ$ .

#### LEĐNI UGAO, $\alpha$ [°]

Leđni ugao direktno utiče na postojanost alata. Pri povećanju leđnog ugla dolazi do smanjenja ugla reznog klina tako da režno sečivo ima znatno manju čvrstoću, a odvođenje toplote je znatno slabije. Ovakav izbor leđnog ugla smanjuje postojanost alata [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56].

Prednosti povećanja leđnog ugla, do optimalne vrednosti, obezbeđuje:

- Smanjenje radijusa vrha alata što dovodi do smanjenja sile trenja. Ovaj efekat posebno je vidljiv pri obradi sa malim korakom. Kao rezultat generiše se manja količina toplote i povećava se postojanost alata.

- Mogućnost da se skida veća količina materijala pri dostizanju određene vrednosti širine leđnog pojasa habanja što povećava postojanost.

UGAO NAGIBA SEČIVA,  $\lambda$  [°]

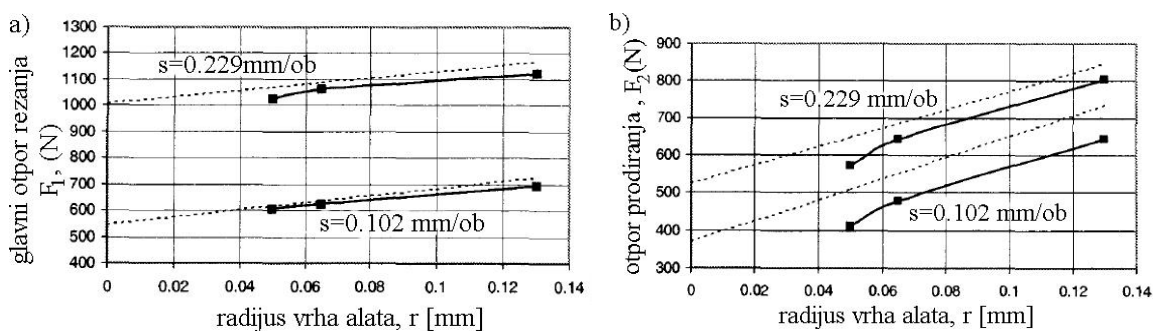
Pravac i način odvođenja strugotine definišu ugao nagiba sečiva i napadni ugao.

Povećanjem ugla nagiba sečiva smanjuje se rezultujući otpor rezanja što ukazuje na poboljšanje mehanizma formiranja strugotine i smanjenje energetskog bilansa.

RADIJUS VRHA ALATA,  $r$  [mm]

Promena radijusa vrha alata ima uticaj na komponente otpora rezanja. Vrh alata ne može biti apsolutno oštar, radijus ne može biti manji od 0.02mm. Postoje dobri razlozi zbog čega je koristan radijus na vrhu alata: povećava otpornost reznog sečiva, dozvoljava nanošenje raznih vrsta prevlaka i pomaže u smanjenju vibracija prilikom rezanja, [57, 58, 59, 60, 61, 62].

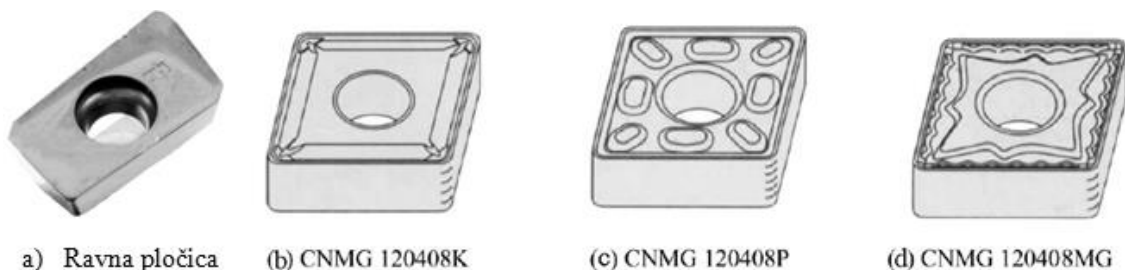
Eksperimentalni rezultati pokazuju da je uticaj radijus vrha alata na komponente otpora rezanja očigledan. Tako su na primeru obrade č 4732 na strugu (Gisholt) alatom od tvrdog metala (Kennametal KC850) merene komponente otpora rezanja pomoću trokomponentnog dinamometra (Kistler), a rezultati su prikazani na slici 46. Glavni otpor rezanja pri relativno malim brzinama rezanja i koraku povećava se neznatno sa 625 N na 700 N. Povećanje otpora pomoćnog kretanja je najveće sa 450 N na 600 N. Otpor prodiranja povećava se sa 190 N na 275 N. Pri povećanju koraka povećavaju se i komponente otpora rezanja.



Slika 46. Zavisnost komponentata otpora rezanja u funkciji radijusa zaobljenja vrha alata: a) glavnog otpora rezanja, b) otpora prodiranja, [57]

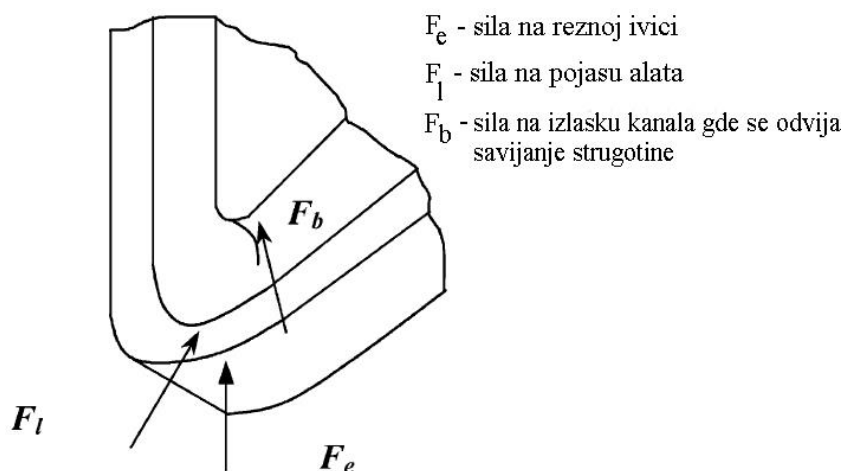
## OBLIK KARBIDNE PLOČICE

Za svaki oblik karbidne pločice postoje četiri osnovna tipa: ravna pločica i tri vrste pločica sa različitim oblicima kanala na grudnoj površini, slika 47.



Slika 47. Tipovi karbidnih pločica: a) ravna, b), c), d) sa kanalima, [33]

Kada se obrada vrši ravnom pločicom merenjem širine leđnog pojasa habanja ili merenje kratera habanja utvrđuje se stepen zatupljenosti alata i samim tim postojanost. U praksi za operacije struganja koriste se pored ravnih i pločice sa kanalima koje praktično usitnjavaju strugotinu na manje delove kojom se lako manipuliše u smislu odlaganja. Istraživači K. Ee, A. Balaji i I. Jawahir napravili su uprošćen model otpora-sila koji deluju na pločice sa žlebovima, slika 48.

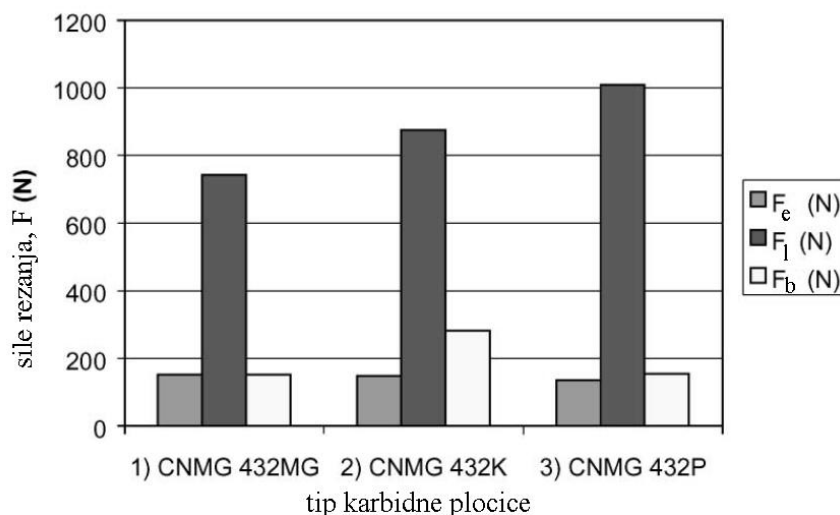


Slika 48. Otpori koji deluju na pločicu sa žlebovima na karakterističnim mestima, [33]

Zbir sve tri sile mora da bude jednak izmerenoj sili-otporu.

Zavisnost komponenta otpora rezanja za slučaj obrade čelika Č1530 (172 BHN – 192 BHN) sa pločicom od tvrdog metala sa troslojnom prevlakom (TiN-TiCN-TiC) (CNMG 120408K, CNMG 120408P, CNMG 120408MG) prikazan je na slici 49.





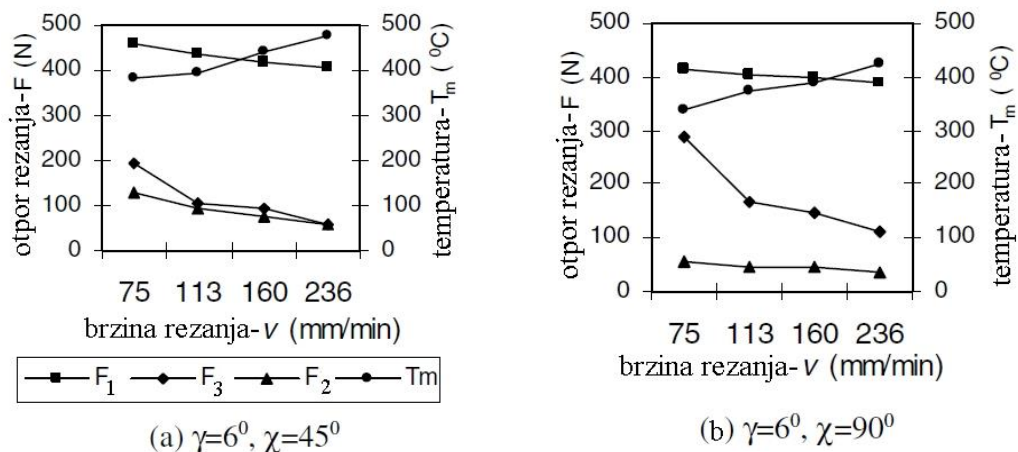
Slika 49. Sile-otpori na pločici sa žlebovima pri zahvatu struganja č1531 ( $a = 1.9\text{ mm}$ ,  $s = 0.25\text{ mm/o}$  i  $V = 274\text{ m/min}$ ), [33]

Sile koje se javljaju na karbidnoj pločici sa žlebovima najmanje su kada se koristi pločica koja je prikazana na slici 47 d što znači da, kada bi se pomenute sile dekomponovale, u komponente otpora rezanja (glavni otpor, otpor prodiranja i otpor pomoćnog kretanja) bile bi najmanje. Samim tim pretpostavlja se da bi pločica tipa CNMG 432MG imala i najveću postojanost, [2], [33].

### 3.2.2 Uticaj režima rezanja na otpore rezanja

#### BRZINA REZANJA, $V[m/min]$

Pri povećanju brzine rezanja dolazi do smanjenja otpora rezanja i povećanja temperature rezanja. Ovaj zaključak je potvrđen eksperimentalnim putem pri obradi čelika č1531 (40HRC) na CNC strugu koristeći alat sa karbidnom pločicom (Komet WCMT 040303 FR ES P25M). Zavisnost komponenta otpora rezanja i temperature od brzine rezanja prikazan je na slici 50.



Slika 50. Zavisnost komponenti otpora rezanja, temperature i brzine rezanja: a)  $\kappa = 45^{\circ}$ , b)  $\kappa = 90^{\circ}$ , [48]

Sa porastom brzine rezanja najveći pad ima otpor pomoćnog kretanja zatim otpor prodiranja i na kraju glavni otpor rezanja. Sa slike 50 može se videti da se pri povećanju brzine rezanja povećava i temperatura rezanja.

#### DUBINA REZANJA, $a$ [mm]

Sa porastom dubine rezanja dolazi do linearnog porasta sve tri komponente otpora rezanja.

#### KORAK, $s$ [mm/o]

Povećanje koraka utiče na povećanje otpora rezanja i direktno utiče na pogoršanje kvaliteta obrađene površine.

### 3.2.3 Uticaj materijala obratka na otpore rezanja

Poznato je da se neke grupe čelika lakše obrađuju, a neke teže u zavisnosti od fizičko-mehaničkih karakteristika i obradljivosti. To znači da obradljivost nije prosta karakteristika materijala već odražava način ponašanja materijala u toku procesa obrade, [40, 63, 64, 65, 66, 67, 68].

U cilju ispitivanja uticaja materijala obratka na otpore rezanja sprovedena su istraživanja obrade četiri grupe čelika čiji je hemijski sastav prikazan u tabeli 7.

Tabela 7. Hemijski sastav materijala obratka

Oznaka materijala obratka	Grupa čelika	Hemijski sastv %							Tvrdća [HB]
		C	Si	Mn	Cr	P	S	V	
č 0563	A	0.2	0.55	1.6	0.3	0.05	0.05	-	178
č 1730	B	0.6	0.4	0.8	0.15	0.04	0.04	-	230
14NiCr14 (DIN)	C	0.34	0.30	0.80	2.50	0.03	0.03	0.2	360
15NiCr14 (DIN)	D	0.17	0.50	0.80	0.90	0.3	0.3	-	211

Pripremi prečnika  $\phi 160 \text{ mm}$  dužine 500 mm obrađivani su na univerzalnom strugu SUI-50 (P=30kW) alatom sa izmenljivom pločicom od tvrdog metala P20-TX20 (bez oborene ivice) sa režimima rezanja:  $V = 110 \text{ mm/min}$ ,  $a = 1.2 \text{ mm}$ ,  $s = 0.21 \text{ mm/o}$ . Za merenje otpora koristi se dinamometr Kistler 9257A, sa zapisom u vremenskom intervalu od 5 min za svaki materijal obratka.

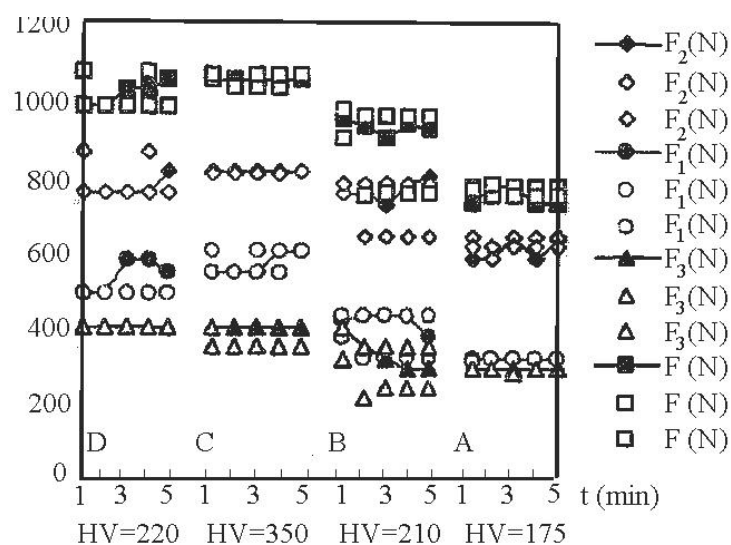
Materijali obratka imaju strukturu koja se sastoji od ferita i perlita u odnosu koji određuje procenat ugljenika. Mikrostruktura čelika iz grupe A sadrže približno 60-70% karbida i perlita. Tvrdća ferita kreće se u intervalu 150-160 HV, a perlita 200-220 HV. Mikrostruktura čelika iz grupe B znatno je grublja i ima uključke, uslovljena je normalizacijom i pri tom nije lamelarna.

Mikrostruktura čelika iz grupe C poseduje uključke i sadrži 2% Cr i V što rezultira povećanjem modula elastičnosti i zatezne čvrstoće.

Mikrostruktura čelika iz grupe D koja je normalizovana sastoji se od nagomilanog finog ferita i karbida.

Suštinska razlika navedenih grupa čelika je u veličini zrna. Čelici iz grupa A i D imaju prosečnu veličinu zrna 23-24  $\mu\text{m}$  koja je dva do tri puta veća od zrna koje su prisutni u mikrostrukturi čelika iz grupa B i C.

Komponente otpora rezanja  $F$  zavise od mikrostrukture čelika odnosno veličine i raspodele feritne i perlitne faze. Komponente otpora rezanja linearno se smanjuju pri smanjenju tvrdoće materijala obratka. Pri povećanju zatezne čvrstoće materijala obratka za 48% povećavaju se vrednosti komponenata otpora rezanja za 30-80%. Rezultujući otpor rezanja povećava se 42%, otpor prodiranja za 31% i glavni otpor rezanja za 36 %, slika 51.



Slika 51. Zavisnost komponenata otpora rezanja i tvrdoće materijala obratka (A,B,C,D)

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja zaključuje se da struktura materijala obratka utiče na komponente otpora rezanja:

- Sa porastom tvrdoće rastu i komponente otpora rezanja,
- Amplitudne karakteristike komponenata otpora rezanja zavise od veličine zrna mikrostrukture (feritne i perlitne faze).

### 3.3 Faktori koji utiču na postojanost alata

#### 3.3.1 Uticaj režima rezanja na postojanost alata

Obradljivost je važna karakteristika koja utiče na ekonomiju proizvodnje mašinskih delova. Obradljivost materijala obratka može se definisati preko: sile i snage rezanja, habanja alata i kvaliteta obrađene površine. Materijal obratka koji ima dobru obradljivost ne zahteva veliku potrošnju energije, ne haba alat u velikoj meri što znači da alat ima dobru postojanost i naravno obezbeđuje dobar kvalitet obrađene površine. U proizvodnim uslovima, postojanost alata i kvalitet obrađene površine smatraju se najvažnijim faktorima kada je u pitanju obradljivost.

Rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazuju da brzina rezanja ima mnogo veći uticaj na postojanost alata nego korak. U obradi metala rezanjem, na habanje leđne površine alata utiču materijal alata i obratka, kontaktna naprezanja i temperatura rezanja. Habanje alata je kompleksan fenomen. Uopšteno, pohaban alat utiče na kvalitet obrađene površine i uslovljava promenu komponenata otpora rezanja na osnovu kojih se može oceniti postojanost alata. Kada se govori o obradi rezanjem cilj je da se utvrde režimi rezanja koji obezbeđuju optimalnu postojanost alata i ekonomičnost proizvodnje, [69, 70, 71, 72, 73, 74].

U eksperimentu koji pokazuje zavisnost režima rezanja i postojanosti alata obrađivana su tri različita materijala obratka čiji je hemijski sastav dat u tabeli 8. Materijali koji su obuhvaćeni ovim istraživanjem imaju veliku primenu u auto industriji.

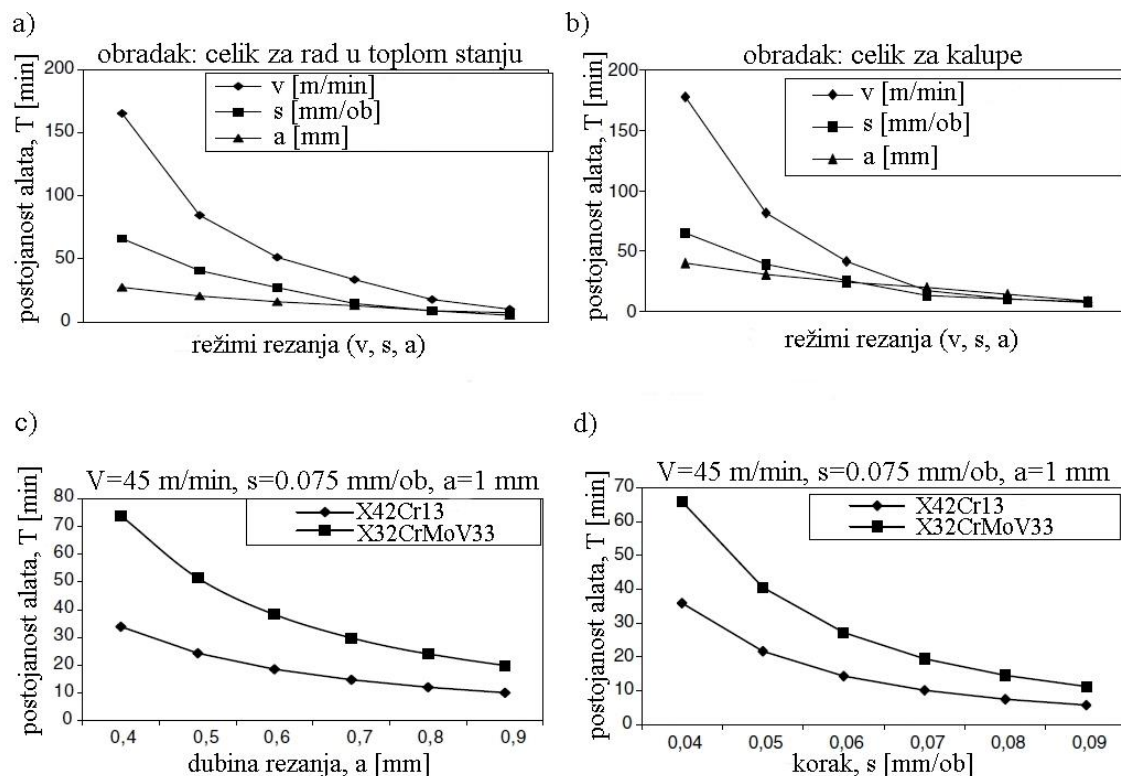
Tabela 8. Hemijski sastav materijala obratka

Oznaka materijala obratka	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	Namena
90MnCrV8 (Č3840)	2.0	0.4	-	0.1	čelici za rad u hladnom stanju
X32CrMoV33	0.3	3.0	2.8	0.5	čelici za rad u toplom stanju
X42Cr13	0.5	13.6	-	0.3	čelici za kalupe

Uslovi obrade: obradni sistem: strug TOS (snaga motora  $P = 5.5$  kW), obradak  $\phi 85 \times 340$  mm. Kao kriterijum zatupljenosti alata uzima se širina pojasa habanja na leđnoj površini  $B_L = 0.6$  mm. Zahvat uzdužnog struganja prekidan je na svakih 60 mm

rezanja i merena je širina leđnog pojasa habanja alata. Optičkim mikroskopom Nikon 104 mereno je srednje aritmetičko odstupanje profila obrađene površine, [69].

Brzina rezanja, korak i dubina rezanja imaju veliki uticaj na postojanost alata, što je potvrđeno rezultatima istraživanja koji su prikazani na slici 52.



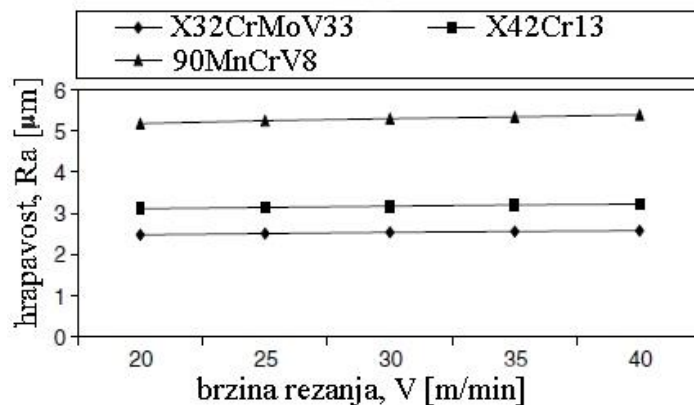
Slika 52. Zavisnost postojanosti alata u funkciji režima rezanja: a) čelik za rad u toplom stanju, b) čelik za kalupe, c) dubine rezanja, d) koraka, [69]

Sa slike 52 može se videti da je postojanost alata dosta veća kod čelika za rad u toplom stanju u odnosu na čelike za kalupe, dok je uticaj dubine rezanja zanemariv u odnosu na ostale parametre.

Kada se alat zatupi (pohaban) dolazi do značajnog povećanja glavnog otpora rezanja.

Eksperimenti su pokazali da od svih oblika habanja habanje leđne površine alata je najčešći oblik koji se susreće. Širina leđnog pojasa habanja direktno utiče na tačnost izrade i kvalitet obrađene površine mašinskog dela.

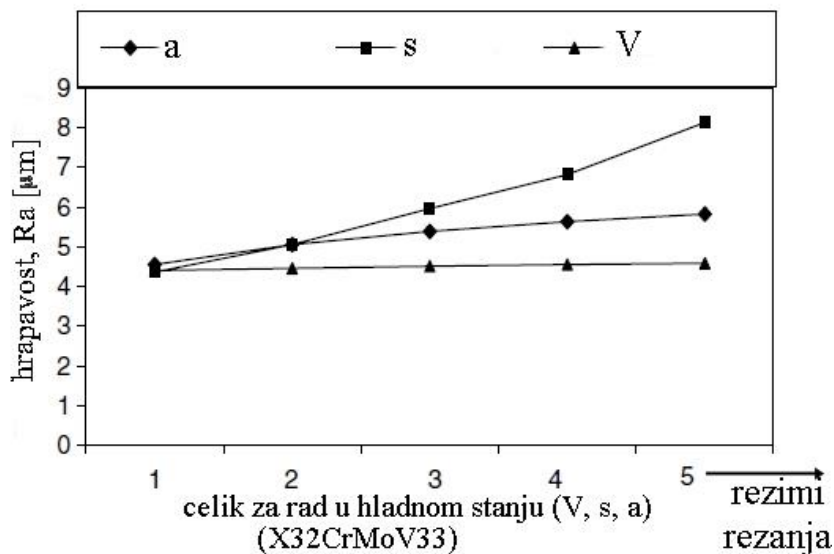
Uticaj brzine rezanja (za različite materijale obratka) na kvalitet obrađene površine izražen preko srednjeg aritmetičkog odstupanja profila ( $R_a$ ) prikazan je na slici 53.



Slika 53. Promena hrapavosti u funkciji brzine rezanja, [69]

Sa slike 53 se može zaključiti da porastom tvrdoće materijala obratka, pri istoj brzini rezanja, dovodi do povećanja hrapavosti obrađene površine [16].

Uticaj režima rezanja na kvalitet obrađene površine (hrapavost) prikazan je na slici 54.



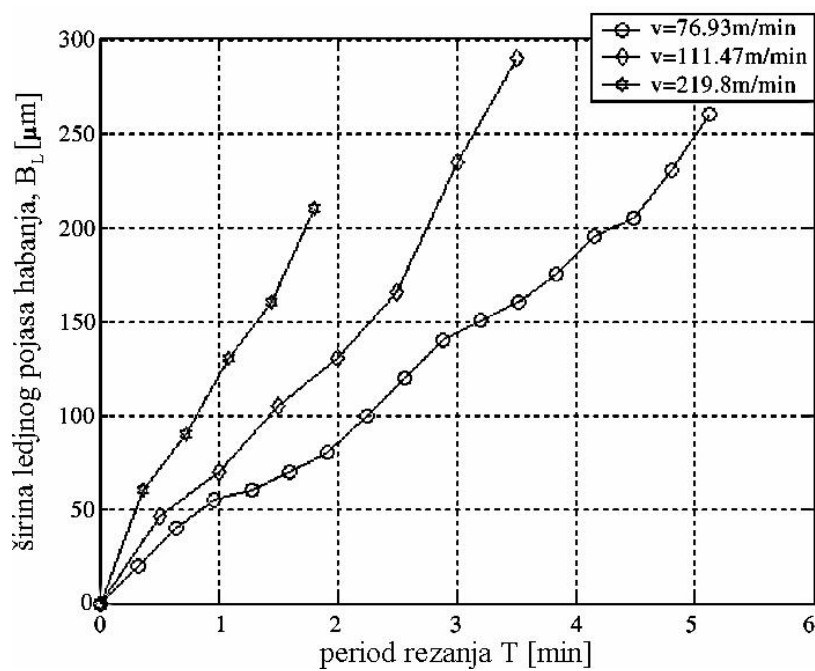
Slika 54. Uticaj režima rezanja na hrapavost, [69]

Zaključuje se da je korak najuticajniji faktor na kvalitet obrađene površine odnosno na hrapavost, zatim dubina i brzina rezanja. Uticaj brzine rezanja ima praktično zanemariv uticaj na hrapavost. Povećanjem koraka negativno se utiče na hrapavost. Postoji direktna korelacija između otpora rezanja i širine leđnog pojasa habanja alata što omogućava da se može uspostaviti matematički model postojanosti alata [5, 42].

### 3.3.2 Uticaj širine leđnog pojasa habanja alata na postojanost

Širina leđnog pojasa habanja predstavlja jedan od najvažnijih kriterijuma, čija maksimalna dozvoljena vrednost, definiše postojanost alata. Širina leđnog pojasa habanja ima odlučujući uticaj na kvalitet obrađene površine.

U cilju utvrđivanja zavisnosti između širine leđnog pojasa habanja alata i postojanosti izveden je eksperiment i to pod sledećim uslovima: obradak prečnika  $\phi 50\text{mm}$ , od niskolegiranog alatnog čelika obrađuje se oslojenom pločicom od tvrdog metala sa TiC prevlakom ( $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$  i  $r = 0.4\text{mm}$ ). Elementi režima obrade:  $a = 1\text{mm}$ , ( $s = 0.0794 - 0.3175\text{mm/ob}$ ), ( $V = 76 - 219\text{m/min}$ ). Za merenje širine leđnog pojasa habanja alata korišćen je optički mikroskop. Na slici 55 su prikazani rezultati sprovedenih istraživanja.



Slika 55. Zavisnost širine leđnog pojasa habanja alata i perioda rezanja – postojanosti pri koraku ( $s = 0.1588\text{ mm/o}$ )

Može se zaključiti da se sa povećanjem brzine rezanja povećava širina leđnog pojasa habanja, što dovodi do smanjenja postojanosti alata [81, 82, 83, 84, 85, 86, 87].



### 3.4 Rangiranje faktora koji utiču na brzinu, intenzitet procesa habanja alata i postojanost

Uzimajući u obzir pregled dosadašnjih istraživanja u domenu habanje-postojanost pri ortogonalnom rezanju kao i uticajnih parametara na brzinu, intenzitet i karakter procesa habanja alata može se izvršiti njihovo rangiranje. Na osnovu literaturnih izvora u ovoj oblasti, uočava se nedostatak radova koji u mehanistički pa i analitički model rezanja uzimaju u obzir koeficijent trenja između ledne površine alata i obrađene površine.

Izvršeno rangiranje uticajnih parametara na brzinu, intenzitet procesa habanja alata i postojanost grafički je prikazan na slici 56. Rangiranje uticajnih parametara poslužiće za definisanje matematičkih modela sila-otpore rezanja, širine lednog pojasa habanja alata i postojanosti.

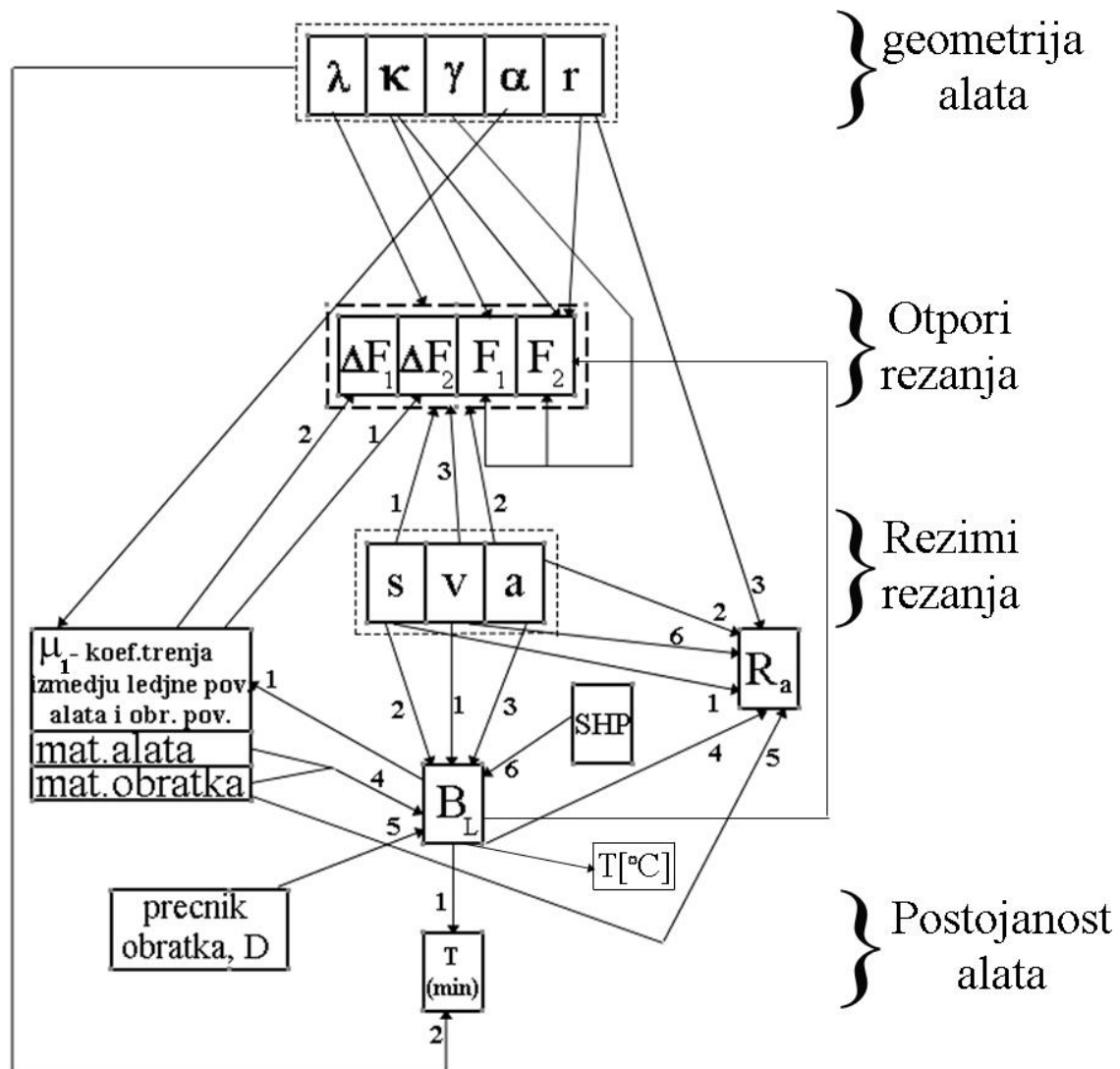
#### a) Faktori koji utiču na otpore rezanja su:

Najveći uticaj na komponente otpora rezanja imaju: a) **korak**, b) **dubina rezanja**, c) **brzina rezanja**.

Sa aspekta geometrije alata najveći uticaj na otpore rezanja imaju:

**Napadni ugao  $\kappa$**  - ima najveći uticaj na otpor prodiranja  $F_2$  zatim na otpor pomoćnog kretanja  $F_3$  dok je njegov uticaj na glavni otpor rezanja  $F_1$  najmanji. Optimalna vrednost napadnog ugla kreće se u granicama  $\kappa$  [ $60^\circ - 70^\circ$ ]. Napadni ugao je jedini od svih elemenata geometrije alata koji direktno utiče na postojanost alata i naravno ako se kreće u optimalnim granicama povećava postojanost i do nekoliko puta.

**Grudni ugao  $\gamma$  i ugao nagiba sečiva alata  $\lambda$**  utiču na sve tri komponente otpora rezanja. Optimalna vrednost grudnog ugla iznosi  $\gamma = 12^\circ$ . Ugao nagiba sečiva u većoj meri utiče na pravac odvođenja strugotine nego što utiče na komponente otpora rezanja.



Slika 56. Uticajni parametri na brzinu, intenzitet procesa habanja alata i postojanost,

**Radijus vrha alata**  $r$  ima najveći uticaj na otpor prodiranja  $F_2$  i otpor pomoćnog kretanja  $F_3$  (koji se često u literaturi gledaju u zbiru), a zatim na glavni otpor rezanja  $F_1$ . Naravno najveći uticaj radijus vrha alata ima na teorijsku hrapavost.

**Leđni ugao**  $\alpha$  ima najveći uticaj na koeficijent trenja između leđne površine alata i obrađene površine.

**Na priraštaje komponenti otpora rezanja** najveći uticaj ima koeficijent trenja između leđne površine alata i obrađene zbog porasta širine leđnog pojasa habanja alata. Najveći uticaj na promenu širine leđnog pojasa habanja alata ima otpor prodiranja.

**b) Faktori koji utiču na širinu leđnog pojasa habanja  $B_L$  respektivno:**

- Brzina rezanja  $v$ ,
- Korak  $s$ ,
- Dubina rezanja  $a$ ,
- Koeficijent trenja između leđne površine alata i obrađene površine  $\mu_1$ ,
- Prečnik obrade  $D$ ,
- Vrsta sredstva za hlađenje i podmazivanje (SHP).

**c) Faktori koji utiču na postojanost alata  $T$ , respektivno:**

- Širina leđnog pojasa habanja alata,
- Brzina rezanja,
- Geometrija alata.

**d) Faktori koji utiču na  $R_a$  (hrapavost), respektivno:**

- Korak,
- Dubina rezanja,
- Radijus vrha alata,
- Širina leđnog pojasa habanja,
- Koeficijent trenja između leđne površine alata i obrađene površine,
- Brzina rezanja.

Sušтина analize i rangiranja uticajnih parametara na intenzitet, brzinu habanja i postojanosti alata leži u mogućnosti odabira pogodnih režima rezanja za ekonomičnu proizvodnju i maksimalnu postojanost odnosno iskorišćenje alata.

Rangiranje uticajnih parametara, odnosno njihova osetljivost na postojanost alata i širinu leđnog pojasa habanja, biće osnova za definisanje matematičkog modela postojanosti alata pri ortogonalnom rezanju.

## ***4. OSNOVE MATEMATIČKIH MODELA KOJI DEFINIŠU POSTOJANOST ALATA, ŠIRINU LEĐNOG POJASA HABANJA I OTPORE REZANJA***

---

### **4.1 Definicija matematičkog modela sa osvrtom na modeliranje procesa rezanja**

Apstraktna prezentacija realnog sistema čini sistem modela koji u zavisnosti od načina prikaza može biti: matematički, fizički, simulacioni i šematski.

Većina istraživača koji se bave modeliranjem procesa rezanja obavlja ga zbog svoje intuitivne sposobnosti. Važni parametri obrade metala kao što su sile rezanja, temperatura, postojanost, morfologija strugotine, naponi i deformacije mogu se predvideti ne izvodeći proces rezanja i to zahvaljujući matematičkim modelima. Pravilno postavljen model može da uštedi dosta vremena i novca koji je neophodan za eksperimentalnu verifikaciju. Modeliranje i eksperiment dovode do razumevanja osnovnih pitanja u teoriji obrade metala rezanjem. To znači da bolje razumevanje procesa rezanja rezultira prethodno dobro postavljenom modelu i njegovoj eksperimentalnoj verifikaciji tako da dobijeni rezultati generišu još bolji matematički model na osnovu koga se kreira povratna sprega koja je veoma važna za istraživače i dovodi do neprestanog unapređenja i bolju aproksimaciju matematičkih modela realnom procesu rezanja. Za modeliranje procesa rezanja zainteresovani su naučno istraživačke organizacije i industrija i obe strane imaju koristi i zavise jedni od drugih. Očigledan primer koji potvrđuje prethodnu konstataciju jesu brojni matematički modeli koji predviđaju postojanost alata, otpore rezanja ili širinu leđnog pojasa habanja, [17, 88, 89, 90, 91]. Modelirati proces rezanja ( $F_i, T, B_L$ ) je izuzetno kompleksno upravo zbog prevelikog broja promenljivih koje se moraju, na neki način, uzeti u obzir (materijal alata, materijal obratka, režimi rezanja, upotreba sredstva za hlađenje i podmazivanje,

itd). Upravo zbog velikog broja uticajnih faktora neophodno je dobro postaviti model i imati adekvatne ulazne veličine.

Nakon definisanja fenomena koji se posmatra, i matematički modelira, vrši se izbor vrste tehnike modeliranja:

- Empirijski,
- Analitički,
- Mehanistički,
- Numerički,
- Veštakom inteligencijom (neuronske mreže i sl.)

Kompleksnost modela je povezana sa brojem ulaznih veličina. Za potrebe modeliranja sila rezanja i postojanosti alata koriste se analitički modeli koji zahtevaju da se odrede konstante materijala obratka i alata eksperimentalnim putem. Na ovaj način mogu se dobiti pouzdani i efikasni matematički modeli za razliku od ostalih tehnika modeliranja koje zahtevaju dosta proračuna isključivo primenom računara ili pak generišu matematičke modele koji nisu pogodni za industrijsku praksu iako, u nekim slučajevima, su približniji realnom procesu rezanja.

*Dobro postavljen matematički model predviđa sa velikom tačnošću realan proces koji se posmatra koristeći validne ulazne veličine pod uslovom da su predhodno u matematički model integrisani najuticajniji parametri procesa.*

## **4.2 Pregled postojećih matematičkih modela postojanosti alata**

### 4.2.1 Tejlorov model postojanosti alata

Habanje alata se uvek koristi kao kriterijum postojanosti alata. Uobičajeno je da se kao kriterijum zatupljenosti alata koristi širina leđnog pojasa habanja alata  $B_L$  zbog velikog uticaja na kvalitet obrađene površine i tačnost, [18].

U klasičnoj studiji obrade metala rezanjem F.V.Tejlora 1907. godine, prezentovan je matematički model postojanosti alata:

$$vT^n = C \tag{12}$$

gde su:  $v$  [ $m/min$ ] -brzina rezanja,  $T$  [min] -postojanost alata odnosno period rezanja za koji se razvije dozvoljena širina leđnog pojasa habanja,  $n$  -parametar obradljivosti koji zavisi od materijala alata i obratka kao i uslova rezanja.

Iz matematičkog modela može se zaključiti da je  $C = V$  u slučaju da je  $T = 1$ . Za svaku kombinaciju materijala alata i obratka kao i uslove rezanja određuju se vrednosti eksponenta  $n$  i konstante  $C$ .

Prema originalnom Tejlorovom modelu postojanosti brzina rezanja je jedini uticajni parametar na postojanost. Tačno je da na postojanost najveći uticaj ima brzina rezanja međutim neophodno je uzeti u obzir i druge parametre kao što su korak- $s$  [ $mm/o$ ] i dubina rezanja  $a$  [ $mm$ ] što je obuhvaćeno proširenim Tejlorovim modelom postojanosti alata:

$$VT^n s^b a^d = C \quad (13)$$

#### 4.2.2 Džavahirov model postojanosti alata

Džavahirov model postojanosti alata uzima u obzir kanale za lomljenje strugotine kao i tip prevlake koji je nanešen na pločicu. Postojanost alata definiše kao period rezanja nakon koga dolazi do pogoršanja kvaliteta obrađene površine ili početak prekomernih vibracija [2, 6, 92, 93, 94]. Džavahirov matematički model definiše se kao:

$$T = T_R W_g \left( \frac{V_R}{V} \right)^{\frac{W_c}{n}} \quad (14)$$

gde su:  $T$  -postojanost alata,  $V$  -brzina rezanja,  $n$  -Tejlorov eksponent,  $W_c$  -efekat prevlake na pločici,  $W_g$  - efekat kanala za lomljenje strugotine,  $T_R$  -referentna postojanost alata,  $V_R$  - referentna brzina rezanja.

Džavahirov model postojanosti alata može se napisati i u proširenom obliku kao:

$$T = T_R \frac{k \cdot m}{s^{n_1} a^{n_2}} \left( \frac{V_R}{V} \right)^{\frac{W_c}{n}} \quad (15)$$

gde su:  $k$  -konstanta koja je u funkciji napadnog ugla  $\kappa$  kao i radijusa zaobljenja vrha alata  $r$ ,  $m$  - faktor koji uzima u obzir tip operacije (za slučaj struganja  $m = 1$ ),  $n_1, n_2$  - empirijske konstante.

Izraz koji određuje konstantu  $k$  može se napisati kao:

$$k = \frac{a - r(1 - \cos \kappa)}{\sin \kappa} + \left( \kappa + \sin^{-1} \frac{s}{2r} \right) \frac{\pi \cdot r}{180} \quad (16)$$

Javahir-ov model postojanosti alata za slučaj obrade alatom CNMG 432K sa prevlakom KC 850 može se u sledećem obliku:

$$T = \frac{0.04939}{s^{3.003} a^{1.287}} \left( \frac{687}{V} \right)^{0.712} \quad (17)$$

Jawahi-ov model postojanosti alata približniji je realnom procesu rezanja u odnosu na Tejlorov model postojanosti.

#### 4.2.3 Orbajev i Hajrstov model postojanosti alata

Matematički model postojanosti alata Orbaj-Hajhrst zasniva se promeni odnosa komponenti otpora rezanja uzimajući u obzir elemente režima, [95, 96, 97, 98, 99, 100]. Polazi se od Mekinonovog opšteg izraza za komponente otpora rezanja  $F_i$ :

$$F_i = k_1 k_m k_t s^{a_i} a^{b_i} v^{c_i} (1 + g_i B_L) \quad (18)$$

gde su:  $g_i$  -konstanta,  $k_1$  -konstanta koja uzima u obzir podmazivanje,  $k_m$  - koeficijent koji uzima u obzir tvrdoću materijala obratka,  $k_t$  - koeficijent koji povezuje geometriju alata sa komponentom otpora rezanja koja se posmatra,  $B_L$  -širina leđnog pojasa habanja alata koja se koristi kao kriterijum zatupljenosti,  $a_i, b_i, c_i$  - parametri obradljivosti.

Ovakav matematički model otpora rezanja je složen i u cilju smanjenja zavisnosti između  $F_i$  i  $B_L$  pomenuti model normalizuje se uvođenjem odnosa sa izmerenom komponentom otpora rezanja  $F_j$ :

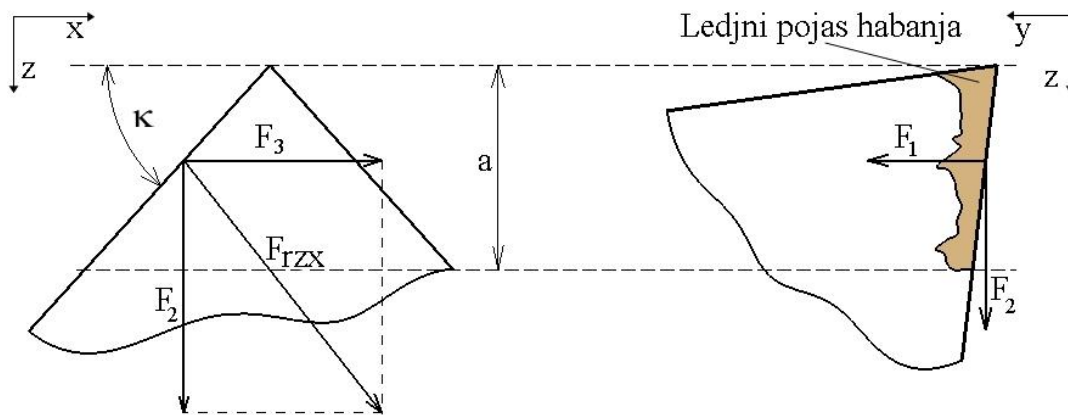
$$\frac{F_i}{F_j} = \frac{k_{t_i} (1 + g_i B_L)}{k_{t_j} (1 + g_j B_L)} s^{(a_i - a_j)} a^{(b_i - b_j)} v^{(c_i - c_j)} \quad (19)$$

Jednačina za postojanost alata, u opštem obliku, može se zapisati na sledeći način:

$$T = \Theta_{\text{početno}}(v, s, a) + \Psi(F_i / F_j) \quad (20)$$

gde je:  $\Theta_{\text{početno}}$  - funkcija početnih uslova rezanja,  $\Psi$  - funkcija trenutnog i početnog odnosa sila odnosno otpora rezanja.

U cilju kvalitetnijeg objašnjenja matematičkog modela polazi se od plana sila u opštem slučaju (koso rezanje), slika 57.



Slika 57. Otpori rezanja pri kosom rezanju.  $F_1$ -glavni otpor rezanja,  $F_2$ -otpor prodiranja,  $F_3$ -otpor pomoćnog kretanja,  $F_{rzx}$ -rezultujući otpor,  $\kappa$ -napadni ugao,  $a$ -dubina rezanja.

Rezultujući otpor komponenti  $F_3$  i  $F_2$  može se napisati kao:

$$F_{rzx} = F_3 \sin \kappa + F_2 \cos \kappa \quad (21)$$

Kao normalizujuća komponenta otpora usvaja se glavni otpor rezanja iz razloga što je najmanje uticajan na širinu leđnog pojasa habanja alata. Suština modela je uspostavljanje odnosa između rezultujućeg otpora  $F_{rzx}$  i glavnog otpora rezanja  $F_1$ .

Na osnovu eksperimentalnih istraživanja, odnosno obrade čelika č 4732 sa troslojnom pločicom ( $TiN - 1\mu m$ ,  $Al_2O_3 - 3\mu m$ ,  $TiC - 5\mu m$ ) proizvođača Sandvik (CG345) pri režimima rezanja:  $v[50 - 200 m/min]$ ,  $s[0.06 - 0.6 mm/o]$ ,  $a[1 - 3 mm]$  može se uspostaviti odnos komponenta otpora rezanja:

$$F_{rzx} / F_1 = 10.79 v^{-0.306} s^{-0.393} a^{-0.188} t^{-0.160} B_L^{0.994} \quad (22)$$

Uzimajući u obzir da se u sprovedenim istraživanjima kao kriterijum zatupljenosti alata uzima širina leđnog pojasa habanja  $B_{Ldoz} = 0.25 mm$ , matematički model postojanosti alata može se napisati kao:



$$T = 78573v^{-1.712}s^{-0.714}a^{-1.107} + 249e^{-78.571(R_f - R_0)} \quad (23)$$

gde su:  $R_0 = F_{rzx0}/F_{10}$  - odnos komponenata otpora rezanja u početnom trenutku rezanja i  $R_f = F_{rzx}/F_1$  - odnos komponenata otpora rezanja u trenutku dostizanja dozvoljene vrednosti širine leđnog pojasa habanja alata. Eksperimentom je pokazano da se vrednosti za  $R_0$  kreću u dijapazonu (0.35 – 0.8), a za  $R_f$  (0.6-1).

Ovakav model postojanosti pokazao se kao dobar i daje pouzdanije rezultate u odnosu na Tejlorov model postojanosti.

#### 4.2.4 Čaudrijevi model postojanosti alata

Čaudrijevi model postojanosti alata obuhvata brzinu rezanja, korak i dubinu rezanja, određen je za uslove obrade: Strug-Colchester M1600, pločica-neoslojena CNMA120404 (H13A), materijal obratka č 4730 (Ø76mm x 250mm). Kriterijum zatupljenosti alata je širina leđnog pojasa habanja  $B_L = 0.3mm$ .

Matematički model postojanosti alata:

$$T = 4564 \cdot v^{-1.79} \cdot s^{-0.48} a^{-0.19} \quad (24)$$

Čaudrijevi metod generisanja matematičkog modela postojanosti alata obuhvata linearnu regresiju i generisanje jednačina prvog i drugog reda uz smanjenje neophodnog broja eksperimenata obezbeđujući veći interval poverenja 95%, [77].

### 4.3 Pregled matematičkih modela koji definišu promenu širine leđnog pojasa habanja alata

U procesu rezanja javlja se habanje leđne površine alata koje u trenutku dostizanja graničnih vrednosti zahteva zamenu alata jer u suprotnom dolazi do porasta komponenti otpora rezanja i pogoršanja kvaliteta obrađene površine. Širina leđnog pojasa habanja formira se pre kratera habanja i lakše se može meriti što ga čini kriterijumom zatupljenosti. Promena širine leđnog pojasa habanja u vremenu odnosno trenutak dostizanja dozvoljene vrednosti definiše postojanost alata. Kao primer navodi se, dobro

poznata, zavisnost širine leđnog pojasa habanja alata i vremena gde se uočavaju zona inicijalnog, ravnomernog i intenzivnog habanja alata. Na promenu širine leđnog pojasa habanja alata najveći uticaj imaju abrazivni i atezioni mehanizmi habanja alata.

#### 4.3.1 Arčardov model habanja

Arčard je predložio sledeći model habanja:

$$W = E \frac{P}{3a} \quad (25)$$

gde su:  $W$  - intenzitet habanja,  $E$  - faktor koji uzima u obzir verovatnoću pojave produkata habanja,  $P$  - opterećenje,  $a$  - radijus zaobljenja kontaktne površine.

Eksperimentalno je dokazano da adhezivna stopa habanja može se napisati kao:

$$\frac{V}{L} = K' A_r \quad (26)$$

gde su:  $V$  - zapremina pohabanog materijala,  $L$  - dužina klizanja,  $K'$  - verovatnoća da će kontakt dveju površina rezultirati pojavom čestica habanja,  $A_r$  - realna površina kontakta.

Predpostavlja se da je kontaktna površina jednaka odnosu opterećenja i tvrdoće vrhova neravnina površina koje se dodiruju:

$$A_r = \frac{P}{H} \quad (27)$$

gde je:  $H$  - tvrdoća neravnina kontaktnih površina.

Kombinacijom jednačina (23) i (24) dobija se sledeća jednačina:

$$V = k \frac{PL}{HB} \quad (28)$$

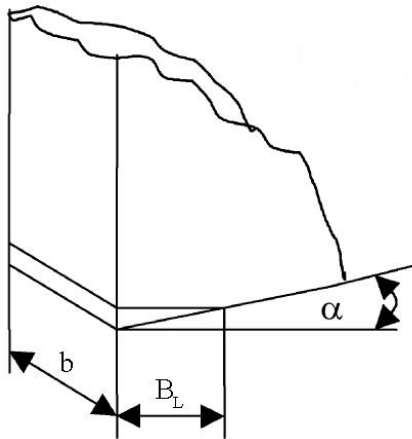
gde je:  $k$  - koeficijent adhezionog habanja,  $HB$  – tvrdoća obratka po Brinelu.

4.3.2 Model promene leđnog pojasa habanja alata pri ortogonalnom rezanju koji se temelji na osnovi matematičkih modela Arčarda, Šoa i Dirkea

Tvrdoća  $H$  i normalno opterećenje su dva glavna parametra koji utiču na habanje. Pod pretpostavkom da je grudni ugao alata jednak nuli, prema slici 58, zapremina pohabanog dela alata može se napisati kao:

$$W = \frac{1}{2} b B_L^2 \tan \alpha \quad (29)$$

gde su:  $W$  - zapremina pohabanog dela alata na leđnoj površini,  $b$  - širina rezanja .



Slika 58. Prikaz rezanog klina za slučaj  $\gamma = 0$

Površina kontakta između alata i obratka može se napisati kao:

$$A = b \cdot B_L \quad (30)$$

Normalni napon na leđnoj površini alata može se napisati kao:

$$\sigma_t = \frac{F_2}{A} = \frac{F_2}{b B_L} \quad (31)$$

gde je  $F_2$  - otpor prodiranja.

Jednačina (30) definiše habanje kao:

$$dW = k \frac{\sigma_t dL}{HB} \quad (32)$$

gde su:  $k$ -koeficijent koji zima u obzir verovatnoću nastajanja čestica usled athezije,  $HB$ -tvrdoća obratka po Brinelu,  $dL$  - elementarna dužina klizanja na kojoj se posmatra elementarna zapremina pohabanog dela alata  $dW$  .

Zamenom jednačine (27) u jednačinu (30) dobija se:

$$B_L = k \left( \frac{2}{b^2 \tan \gamma} \right)^{1/3} \left( \frac{F_2 \cdot L}{HB} \right)^{1/3} \quad (33)$$

ili kao

$$B_L = k \left( \frac{2V}{b^2 \tan \gamma} \right)^{1/3} \left( \frac{F_2 \cdot t}{HB} \right)^{1/3} \quad (34)$$

gde su: L- dužina rezanja, t – glavno vreme rezanja, HB - tvrdoća materijala alata po Brinelu, V- brzina rezanja.

Na osnovu jednačine (31) može se napisati sledeći izraz za promenu širine leđnog pojasa habanja alata u toku vremena koji sa velikom tačnošću opisuje eksperimentalne podatke:

$$B_L = k_1 t^{1/3} \quad (35)$$

Istraživanja su pokazala da je pri uzdužnoj obradi čelika č 4732 strugarskim nožem sa pločicom od tvrdog metala, bez prevlake ( $v = 0.254 \text{ m/s}$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ) dobijena vrednost koeficijenta  $K_1 = 0.101414$ , odnosno dobra korelaciju eksperimentalnih podataka i matematičkog modela, [76, 83, 101, 102, 103, 104].

#### 4.3.3 Promena zapremine pohabanog dela leđne površine u vremenu uzimajući u obzir mehanizme habanja (abrazivno, atheziona, difuzno) kao i definiciju pohabanog dela alata na bazi geometrije

Ukupna promena zapremine pohabanog dela leđne površine alata u vremenu predstavlja zbir tri modela habanja , [104]:

$$\Delta V_{B_L(\text{ukupno})} = \Delta V_{\text{abrazija}} + \Delta V_{\text{athezija}} + \Delta V_{\text{difuzija}} \quad (36)$$

gde su:  $\Delta V_{\text{abrazija}}$  - promena zapremine pohabanog dela alata usled abrazivnog mehanizma habanja,  $\Delta V_{\text{athezija}}$  - promena zapremine pohabanog dela alata usled athezionog mehanizma habanja,  $\Delta V_{\text{difuzija}}$  - promena zapremine pohabanog dela alata usled athezionog mehanizma habanja

$$\Delta V_{abrazija} = k_{abrazija} \cdot k \left( \frac{P_a^{n-1}}{P_t^n} \right) V B_L \bar{\sigma} \Delta t \quad (37)$$

gde su:  $k_{abrazija}$  - konstanta habanja usled mehanizma abrazije,  $k, n$  - veličine koje definišu odnos tvrdoće materijala alata i obratka,  $P_a$  - tvrdoća alata,  $P_t$  - tvrdoća materijala alata,  $v$  - brzina rezanja,  $B_L$  - širina leđnog pojasa habanja alata,  $\bar{\sigma}$  - srednji pritisak na pohabanoj leđnoj površini alata,  $\Delta t$  - vreme.

$$\Delta V_{athezija} = k_{athezija} \cdot e^{a_2 t} \cdot V \cdot b \cdot \bar{\sigma} \cdot \Delta t \quad (38)$$

gde je:  $k_{athezija}$  - konstanta habanja usled mehanizma athezije.

$$\Delta V_{difuzija} = k_{difuzije} \sqrt{V \cdot B_L} e^{-k_Q(T+273)} b \Delta t \quad (39)$$

gde je:  $k_{difuzije}$  - konstanta habanja usled mehanizma difuzije,  $a_2, k_Q$  - određuju se eksperimentalno i zavise od materijala alata i obratka.

Uzimajući u obzir pohabanu zapreminu alata na bazi prostog izvođenja, slično kao na slici 14, postojanost alata može se izraziti preko ukupne dužine klizanja kao:

$$L = B_L \left/ \frac{(\cot \alpha + \tan \gamma) R}{(B_L (R - B_L \tan \alpha))} \left( \frac{\Delta V_{abrazija} + \Delta V_{athezija} + \Delta V_{difuzija}}{\Delta t} \right) \right. \quad (40)$$

#### 4.3.4 Valdorfov model ortogonalnog rezanja koji uključuje habanje leđne površine alata

Valdorf [58] je kombinovao model rezanja Šia i Ramalingama kao i Tomsena koji je dokazao da je pohabani deo leđne površine paralelan sa brzinom rezanja i može se proširiti na deo radijusa zaobljenja alata. Valdorfov model opisuje raspodelu napona na pohabanom delu leđne površine alata. Otpori rezanja nastali usled pojave leđne površine habanja mogu se naći integraljenjem normalnog napona  $\sigma_w$  i tangencijalnog napona  $\tau_w$  na sledeći način:

$$\Delta F_1 = b \cdot \int_0^{B_L} \tau_w(x) dx \quad (41)$$

$$\Delta F_2 = b \cdot \int_0^{B_L} \sigma_w(x) dx \quad (42)$$

pri čemu je  $x$  rastojanje od vrha alata mereno duž leđne površine.

Valdorfov model odnosi se na elastične deformacije koje se dešavaju sve do dostizanja kritične širine leđnog pojasa habanja  $B_L^*$  nakon koje počinju plastične deformacije.

Uzimajući u obzir uslov da je  $B_L < B_L^*$  i  $B_L \neq 0$  naponi na leđnoj površini alata mogu se napisati kao :

$$\sigma_w(x) = \sigma_0 \left( \frac{B_L - x}{B_L} \right)^2$$

$$\tau_w(x) = \tau_0 \text{ za } 0 < x < B_L \left( 1 - \sqrt{\frac{\tau_0}{\sigma_0}} \right) \quad (43)$$

$$\tau_w(x) = \mu_1 \sigma_w(x) \text{ za } B_L \left( 1 - \sqrt{\frac{\tau_0}{\sigma_0}} \right) < x < B_L$$

gde su,

$$\sigma_0 = k \left[ 1 + \frac{\pi}{2} - 2\delta - 2\phi + 2\gamma + 2\sin(2\gamma - 2\phi) \right] \quad (44)$$

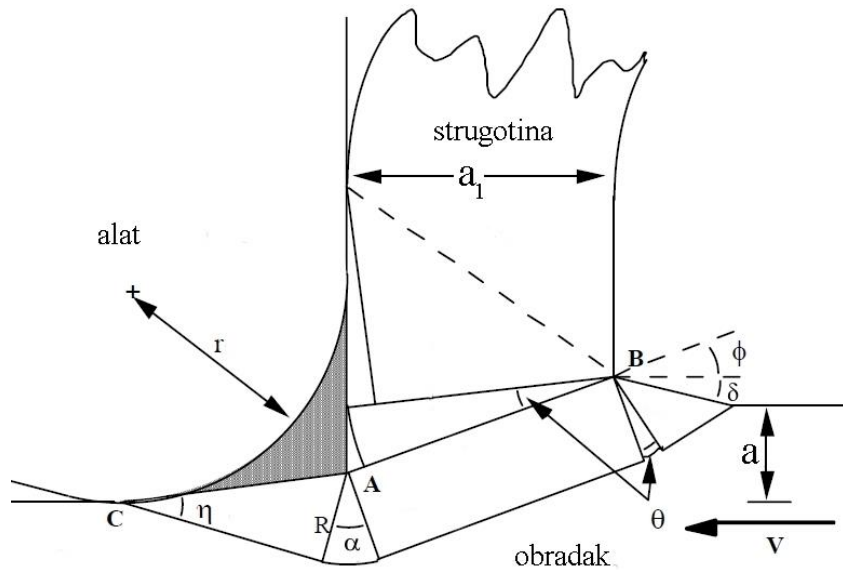
$$\tau_0 = k \cos(2\gamma - 2\phi)$$

gde je  $k$ - faktor koji uzima u obzir smicanje materijala obratka.

$$\gamma = \eta_p + \phi - \sin^{-1}(\sqrt{2} \sin(\delta) \sin(\eta_p)) \quad (45)$$

$$\eta_p = 0.5 \cos^{-1}(m_p)$$

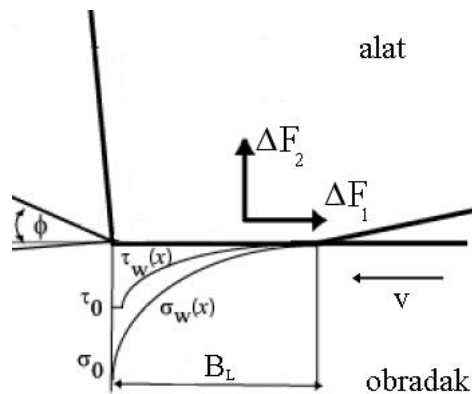
gde su karakteristični uglovi  $\delta$  i  $\eta_p$  kao i uprošćeni model klizanja linije smicanja prikazani na slici 59.



Slika 59. Model rezanja-klizanje linije smicanja

Gde je  $m_p$  - faktor koji uzima u obzir trenje. Uobičajeno je da je vrednost ugla  $\delta = 0$ .

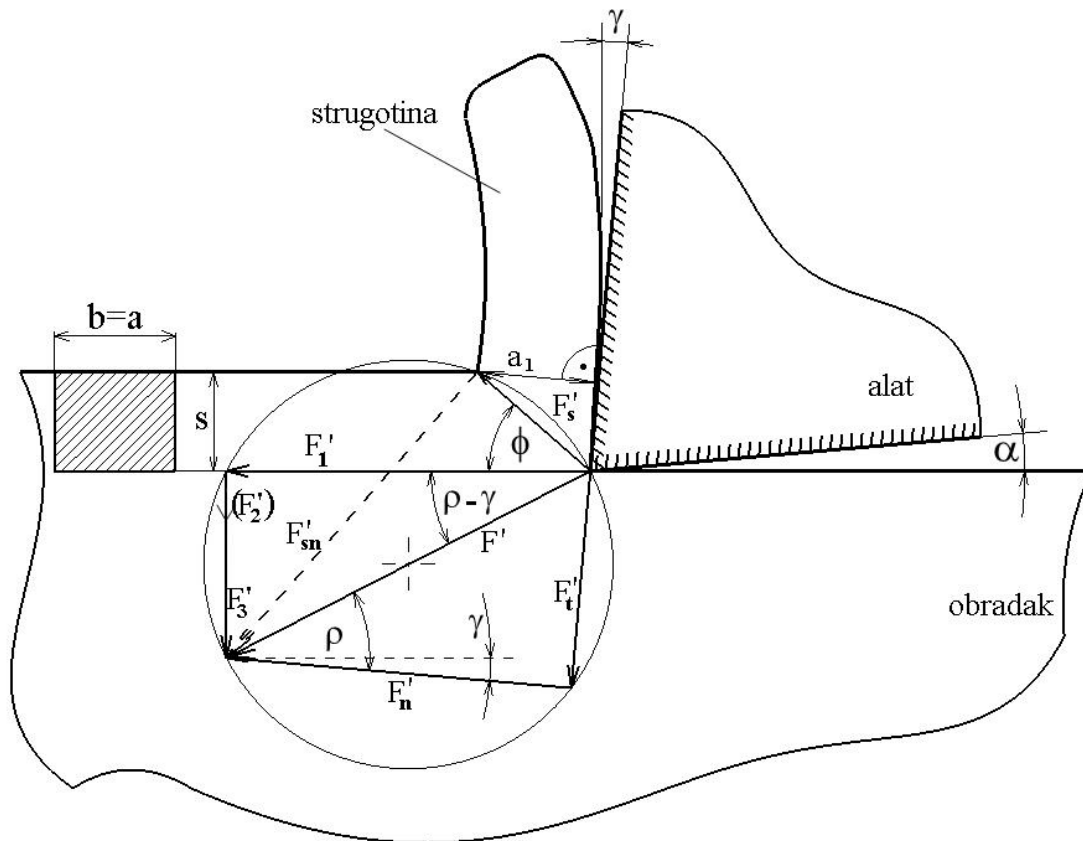
Raspodela napona na leđnoj površini alata prikazana je na slici 60.



Slika 60. Raspodela normalnog i tangencijalnog napona na pohabanom delu leđne površine alata

#### 4.4 Merčantov model sila

Rezni klin prodire u materijal obratka pod dejstvom mehaničke sile rezanja  $F'$ . Sila koja je po intenzitetu i pravcu jednaka sili rezanja, a suprotnog je smera i opterećuje rezni klin alata, naziva se otpor rezanja  $F$ . Na slici 61 prikazan je po Merčantu uprošćen opšti model sila koje se pojavljuju pri ortogonalnom rezanju ili koje se pojavljuju u normalnom preseku pri kosom rezanju, [29]. Merčant je u svom eksperimentu obrađivao cev nožem za odsecanje čija je dužina glavnog sečiva bila veća od debljine zida cevi. Zbog obrade cevastog priprema sile  $F_2'$  i  $F_3'$  su kolinearne i pri merenju je korišćen dvokomponentni dinamometar.



Slika 61. Sile pri ortogonalnom rezanju gde su:  $F'$ -sila rezanja,  $F_1'$ -glavna sila rezanja,  $F_2'$ -sila prodiranja,  $F_3'$ -sila pomoćnog kretanja  $F_s'$ -sila smicanja strugotine,  $F_{sn}'$ -normalna sila u ravni smicanja,  $F_n'$ -normalna sila,  $F_t'$ -tangencijalna sila,  $a_1$ -debljina strugotine.



Merčantov model temelji se na sledećim pretpostavkama :

- zona smicanja je tanka,
- strugotina je kontinualna (tip II),
- režno sečivo je normalno na pravac relativnog kretanja alata u odnosu na obradak,
- alat je idealno oštar,
- smicanje se odvija u ravni,
- nema sabijanja strugotine, [65].

Merčantov model omogućava određivanje ostalih sila rezanja na osnovu nekoliko poznatih (izmerenih) sila, brzo određivanje trenja između strugotine i grudne površine alata.

Prema Ernest-Merčant teoriji ugao smicanja se može naći iz uslova koji definiše minimalan rad koji je proporcionalan glavnoj sili rezanja. To praktično znači da se odredi ugao smicanja koji daje minimalnu vrednost glavne sile rezanja. Silu smicanja moguće je napisati kao:

$$F'_s = F' \cos(\phi + \rho - \gamma) \quad (46)$$

Sila smicanja strugotine može se definisati kao proizvod površine smicanja  $A_s$  i napona smicanja  $\tau_s$ :

$$F'_s = \tau_s A_s = \frac{\tau_s A_c}{\sin \phi} \quad (47)$$

gde je  $A_c$  - površina nedeformisane-nesabijene strugotine.

Sila rezanja može se napisati kao:

$$F' = \frac{\tau_s A_c}{\sin \phi} \cdot \frac{1}{\cos(\phi + \rho - \gamma)} \quad (48)$$

Glavna sila rezanja može se napisati kao:

$$F'_1 = F' \cos(\rho - \gamma) \quad (49)$$

$$F'_1 = \frac{\tau_s A_c}{\sin \phi} \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\cos(\phi + \rho - \gamma)} \quad (50)$$

Na osnovu navedenih jednačina zaključuje se da je ugao smicanja još uvek nepoznat i da ga je moguće odrediti iz uslova minimalne potrebne energije u ravni smicanja.

Iz uslova:

$$\frac{\partial(\sin \phi \cos(\phi - \gamma + \rho))}{\partial \phi} = 0 \quad (51)$$

$$\cos \phi \cos(\phi - \gamma + \rho) - \sin \phi \sin(\phi - \gamma + \rho) = 0 \quad (52)$$

sledi da je:

$$\cos(2\phi - \gamma + \rho) = 0 \quad (53)$$

odnosno:

$$2\phi - \gamma + \rho = \frac{\pi}{2} \quad (54)$$

Modifikovan Merčantov oblik definiše ugao smicanja na sledeći način:

$$2\phi - \gamma + \rho = C \quad (55)$$

gde je C faktor koji zavisi od materijala obratka (za čelik  $C = 75^\circ$ , za bakar  $C = 47^\circ$ ).

Najveća mimoilaženja u teoriji obrade rezanjem kada su u pitanju sile-otpori rezanja leži u različitim interpretacijama ugla smicanja čiji su matematički modeli hronološki prikazani u tabeli 1.

Merčantov modelom može se odrediti koeficijent trenja između grudne površine alata i obrađene površine kao odnos između tangencijalne sile  $F_t'$  i normalne sile  $F_n'$ :

$$\mu = \frac{F_t'}{F_n'} = \frac{F_1' \sin \gamma + F_2' \cos \gamma}{F_1' \cos \gamma - F_2' \sin \gamma} \quad (56)$$

Silu smicanja strugotine moguće je napisati kao:

$$F_s' = F_1' \cdot \frac{\cos(\phi + \rho - \gamma)}{\cos(\rho - \gamma)} \quad (57)$$

Merčantov model je praktičan iz razloga što omogućava lako i brzo određivanje odnosno procenu komponentata sile rezanja. Dobijene vrednosti su približne ili prosečne. Sile rezanja moguće je predstaviti grafičkim putem u odgovarajućoj razmeri.

Nedostatak Merčantovog modela je taj važi za slučaj ortogonalnog rezanja i ne uzima u obzir trenje između leđne površine alata i obrađene površine kao ni efekat habanja alata po leđnoj površini.

## **5.     *MATEMATIČKI MODEL SILA REZANJA I POSTOJANOSTI STRUGARSKOG NOŽA U PROIZVODNIM USLOVIMA***

---

Matematički model koji je opisan u ovom poglavlju temelji se na klasičnom modelu sila pri ortogonalnom rezanju odnosno Merčantovom modelu koji je upotpunjen silama koje se javljaju usled pojave širine lednog pojasa habanja i trenjem između ledne površine alata i obrađene površine. Prošireni model sila predviđa ugao trenja između alata obratka. Na osnovu proširenog mehanističkog pristupa modeliranja sila rezanja, uzimajući u obzir rangiranje uticajnih parametara na postojanost alata, u analitičkom obliku generisan je model postojanosti koji može imati veliku primenu u proizvodnim uslovima upravo zbog jednostavnosti njegove praktične implementacije i tačnosti.

Dobro postavljen matematički model aproksimira ponašanje realnog procesa koji se posmatra koristeći validne ulazne veličine pod uslovom da su prethodno u matematički model integrisani najuticajniji parametri procesa.



habanja alata,  $F'(B_L \neq 0)$  - sila rezanja kada je alat zatupljen,  $\Delta F_1'$  - porast glavne sile rezanja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja alata,  $\Delta F_2'$  - porast sile prodiranja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja alata,  $\Delta F'$  - porast sile rezanja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja alata,  $\zeta$  - ugao između  $F'(B_L = 0)$  i  $\Delta F'$ ,  $\mu$  - koeficijent trenja između grudne površine alata i strugotine,  $\mu_1$  - koeficijent trenja između leđne površine alata i obrađene površine.

Uvođenje uticaja širine leđnog pojasa habanja alata u Merčantov model ne utiče na osnovni model stvaranja strugotina pa samim tim i postojanje dodatnih sila koje se javljaju.

Sa slike 62 može se videti da ukupna glavna sila rezanja  $F'_{1UK}$  predstavlja zbir glavne sile rezanja  $F'_1$  (kada je alat oštar,  $B_L = 0$ ) i  $\Delta F'_1$  porasta glavne sile rezanja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja:

$$F'_{1UK} = F'_1 + \Delta F'_1 \quad (58)$$

Ukupna sila prodiranja  $F'_{2UK}$  predstavlja zbir sile prodiranja  $F'_2$  (kada je alat oštar,  $B_L = 0$ ) i  $\Delta F'_2$  porasta otpora prodiranja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja

$$F'_{2UK} = F'_2 + \Delta F'_2 \quad (59)$$

Sila rezanja kada je alat zatupljen  $F'(B_L \neq 0)$  jednaka je zbiru sile rezanja kada je alat oštar  $F'(B_L = 0)$  i  $\Delta F'$  porasta sile rezanja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja

$$F'_{(B_L \neq 0)} = F'_{(B_L = 0)} + \Delta F' \quad (60)$$

U opštem slučaju, koji je prikazan na slici 62, postoji ugao između sila  $F'(B_L = 0)$  i  $\Delta F'$  i označen je sa  $\zeta$ . Ugao  $\zeta$  može biti pozitivan ili negativan i može se odrediti preko skalarnog proizvoda dva vektora:

$$\zeta = \cos^{-1} \left( \frac{\Delta F'_1 \cdot F'_{(B_L=0)} + \Delta F'_2 \cdot F'_{2(B_L=0)}}{|\Delta F'| \cdot |F'_{(B_L=0)}|} \right) \quad (61)$$





da se na osnovu hipoteze o komplementarnosti uglova trenja izračuna ugao trenja između ledne površine alata i obrađene površine  $\rho_1$ .

Na osnovu izračunatog ugla trenja,  $\rho_1$  može se lako izračunati koeficijent trenja,  $\mu_1$ , između ledne površine alata i obrađene površine.

$$\mu_1 = \operatorname{tg} \rho_1 = \frac{\Delta F_1'}{\Delta F_2'}, \text{ važi samo u slučaju kada je } \zeta = 0^\circ \quad (66)$$

$$\mu_1 = \operatorname{tg} \rho_1 = \frac{F_{1UK}'}{F_{2UK}'}, \text{ u slučaju kada je } \zeta \neq 0^\circ$$

Uzimajući u obzir koeficijent  $k$  koji se odnosi na smicanje materijala obratka čija vrednost ostaje konstantna pri različitim brzinama rezanja i koracima pri procesu rezanja. Shaw i Finnie su 1955 godine na osnovu eksperimentalnih istraživanja matematički opisali koeficijent  $k$  jednačinom:

$$k = \frac{F_1' \cdot \cos \phi - F_2' \sin \phi}{b \cdot \left( \frac{s \cdot e^{\mu \left( \frac{\pi - \gamma}{2} \right)}}{\sin \phi} \right)} \quad (67)$$

gde su:  $b$  - širina rezanja,  $s$  - korak,  $\phi$  - ugao smicanja,  $\mu$  - koeficijent trenja između strugotine i grudne površine alata.

Eksperimentalno je određena vrednost koeficijenta  $k$  od strane Bleka (1979) čija vrednost približno iznosi  $k = 226.5 \text{ N/mm}^2$  što omogućava da se odredi vrednost normalnog i tangencijalnog napona na vrhu alata, pomoću jednačine (44).

Integraljenjem jednačine (42) dobija se vrednost  $\Delta F_2'$  - porast sile prodiranja usled postojanja širine lednog pojasa habanja  $B_L$ .

$$\Delta F_2 = b \cdot \int_0^{B_L} \sigma_w(x) dx = \frac{b \cdot \sigma_0}{B_L^2} \int_0^{B_L} (B_L - x)^2 dx = \frac{b \cdot \sigma_0}{3} B_L \quad (68)$$

Uzimajući u obzir jednačine (66) može se izračunati vrednost porasta glavne sile rezanja  $\Delta F_1'$  usled postojanja širine lednog pojasa habanja alata.

$$\mu_1 = \operatorname{tg} \rho_1 = \frac{\Delta F_1'}{\Delta F_2'} \Rightarrow \Delta F_1' = \Delta F_2' \cdot \operatorname{tg} \rho_1 \quad (69)$$



Na ovaj način mogu se odrediti ukupna glavna sila rezanja  $F'_{1UK}$  i ukupna sila prodiranja  $F'_{2UK}$ , jednačine (58) i (59).

Moguće je na osnovu koeficijenta  $k$  i koeficijenta trenja između leđne površine alata i obrađene površine odrediti tangencijalni napona na leđnoj površini alata, jednačina (43), i izračunati porast glavne sile rezanja  $\Delta F'_1$ , a na osnovu jednačine (66) izračunati i  $\Delta F'_2$ .

Na osnovu izračunatih vrednosti porasta sile prodiranja, a uzimajući u obzir uticajne faktore na brzinu, intenzitet i karakter procesa habanja alata kao i dozvoljene vrednosti širine leđnog pojasa habanja alata, kao kriterijum zatupljenja, mogu se analitički pretpostaviti dve jednačine koje definišu postojanost alata u proizvodnim uslovima:

- U slučaju prethodne obrade postojanost se može definisati porastom otpora prodiranja kao prošireni izraz koji obuhvata: brzinu rezanja, korak i glavno vreme rezanja,

$$\Delta F_2 = K_i \cdot V^{p_i} \cdot s^{q_i} \cdot t^{y_i} \quad (70)$$

- U slučaju završne obrade postojanost se može definisati kao prošireni izraz koji obuhvata: brzinu rezanja, korak i širinu leđnog pojasa habanja,

$$T = K_i \cdot V^{p_i} \cdot s^{q_i} \cdot B_L^{y_i} \quad (71)$$

gde su:  $p_i, q_i, y_i$  - parametri obradljivosti;  $K_i$  - konstante.

Sušтина matematičkog modela pruža mogućnost da se na osnovu najuticajnijih faktora na intenzitet i brzinu habanja alata predvidi postojanost alata u proizvodnim uslovima. Matematički model predstavlja nadogradnju Merčantovog modela sila i sa velikom pouzdanošću određuje koeficijent trenja između leđne površine alata i obrađene površine kao i pripadajuće poraste komponenata sila rezanja i svodi broj eksperimenata na najmanju moguću meru.

## 5.2 Numerički primer

Koristeći upotpunjen Merčantov model sila izračunati porast otpora prodiranja usled trenja između ledne površine alata i obrađene površine kao i koeficijent trenja između ledne površine i obrađene površine. Zahvat: uzdužna gruba obrada cilindrične površine. Alat: CTGP,  $\kappa = 91^\circ$ ,  $\kappa_1 = 29^\circ$ ,  $r = 0.4\text{mm}$ ,  $\gamma = 0^\circ$ , P10. Obradak: č1531, prečnik obratka  $\phi 140\text{mm}$ . Kvalitet obrađene površine N9 ( $Ra = 6.3\mu\text{m}$ ). Režim rezanja: korak  $s = 0.3\text{mm}/o$ , dubina rezanja  $a = 1\text{mm}$ , brzina rezanja  $v = 110\text{m}/\text{min}$ .

Rešenje:

Režimi rezanja odabrani su na osnovu preporučenih vrednosti. Glavni otpor rezanja određen je na osnovu proširenog izraza:

$$F_1 = C_{k1} \cdot a^{x_1} \cdot s^{y_1} \cdot k_{Fm} = 1500 \cdot 1^1 \cdot 0.3^{0.75} \cdot 0.89 = 541\text{N} \quad (72)$$

Normalni korak:

$$a_1 = a \cdot \sin \kappa_1 = 0.5\text{mm} \quad (73)$$

Određivanje ugla smicanja na osnovu brzine rezanja  $V$ , brzine klizanja strugotine  $V_{st}$ :

$$\frac{V_{st}}{\cos \gamma} = \frac{V}{\cos(\phi - \gamma)} \Rightarrow \frac{132}{0.99} = \frac{110}{\cos(\phi - 6)}; V_{st} = 1.2 \cdot V = 121\text{m}/\text{min} \quad (74)$$

$$\cos \phi = 0.82 \Rightarrow \phi = 34.4^\circ \quad (75)$$

Određivanje ugla trenja:

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} + \frac{\gamma}{2} \Rightarrow \rho = \frac{\pi}{2} + \gamma - 2 \cdot \phi \Rightarrow \rho = 21.2^\circ \quad (76)$$

Određivanje koeficijenta trenja između grudne površine alata i strugotine:

$$\mu = \text{tg} \rho = \text{tg} 21.2 = 0.38 \quad (77)$$

Određivanje ugla trenja i koeficijenta trenja između ledne površine alata i obrađene površine na osnovu hipoteze o komplementarnosti uglova trenja (62):

$$\rho_1 = 90^\circ + \gamma - \rho = 90^\circ + 0^\circ - 34.4^\circ = 55.6^\circ \quad (78)$$

$$\mu_1 = \text{tg} \rho_1 = \text{tg} 55.6^\circ = 1.46 \quad (79)$$

Određivanje otpora rezanja:

$$F_1 = F \cdot \cos(\rho - \gamma) \Rightarrow F = 580\text{N} \quad (80)$$

Određivanje otpora prodiranja:

$$F_2 = F_1 \operatorname{tg} \rho = 209.8 N \quad (81)$$

Određivanje koeficijenta k:

$$k = \frac{F_1' \cdot \cos \phi - F_2' \cdot \sin \phi}{b \cdot \left( \frac{a_1 \cdot e^{\mu \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right)}}{\sin \phi} \right)} = \frac{541 \cdot \cos 34.4 - 209.8 \cdot \sin 34.4}{1 \cdot \left( \frac{0.5 \cdot e^{0.38(\pi/2)}}{\sin 34.4} \right)} = 204.9 N / mm^2 \quad (82)$$

Određivanje normalnog napona:

$$\sigma_0 = k \left[ 1 + \frac{\pi}{2} - 2\delta - 2\phi + 2\gamma + 2 \sin(2\gamma - 2\phi) \right]$$

$$\sigma_0 = 204.9 \left[ 1 + \frac{\pi}{2} - 0 - 2 \cdot 34.4 + 2 \cdot 0 + 2 \sin(2 \cdot 0 - 2 \cdot 34.4) \right] = 4343.8 N / mm^2 \quad (83)$$

Određivanje porasta otpora prodiranja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja:

$$\Delta F_2 = \frac{a \cdot \sigma_0}{3} B_L = \frac{1 \cdot 4343.8}{3} 0.3 = 434.3 N \quad (84)$$

Određivanje porasta glavnog otpora rezanja:

$$\Delta F_1 = \Delta F_2 \cdot \operatorname{tg} \rho_1 = 634.2 N \quad (85)$$

Ukupan glavni otpor rezanja:

$$F_{1_{UK}} = F_1 + \Delta F_1 = 541 + 634.2 = 1175.2 N \quad (86)$$

Ukupan otpor prodiranja:

$$F_{2_{UK}} = F_2 + \Delta F_2 = 209.8 + 434.3 = 644.1 N \quad (87)$$

Otpor rezanja može se napisati kao:

$$F = \sqrt{(F_{1_{UK}})^2 + (F_{2_{UK}})^2} = 1340.1 N \quad (88)$$

### 5.3 Očekivani izlaz iz upotpunjenog Merčantovog modela sila pri ortogonalnom rezanju

Utopunjen Merčantov model sila pri ortogonalnom rezanju daje mogućnost da se na osnovu zadatih režima rezanja, materijala alata i obratka preko proširenih izraza (sa već poznatim parametrima obradljivosti) odredi vrednost glavnog otpora rezanja za slučaj da je alat idealno oštar. Na osnovu prečnika obrade, dubine rezanja i kvaliteta obrađene površine određuju se brzine u zoni rezanja, a zatim i ugao ravni smicanja. Upotrebom klasičnog Merčantovog modela može se odrediti koeficijent trenja između strugotine i grudne površine alata. Kako je pojava habanja alata neizbežna tokom procesa rezanja neophodno je izračunati poraste komponenata sila-otpore rezanja. Utopunjen Merčantov model omogućava da se odredi koeficijent trenja  $\mu_1$  između ledne površine alata i obrađene površine. Koristeći model promene normalnog napona duž širine lednog pojasa habanja može se odrediti vrednost porasta otpora prodiranja koji je u direktnoj vezi sa već određenim uglom trenja između ledne površine alata i obrađene površine na osnovu čega se lako može izračunati vrednost porasta glavnog otpora rezanja. Uzimajući u obzir da li je u pitanju prethodna ili završna obrada, neophodno je odabrati jedan od ponuđenih matematičkih modela postojanosti koji su definisani jednačinama (70), (71) i eksperimentalno odrediti njihove parametre obradljivosti i na taj način sa velikom pouzdanošću predvideti postojanost alata u proizvodnim uslovima. Suština upotunjenog Merčantovog modela sila jeste određivanje stvarne sile rezanja koja uzima u obzir širinu lednog pojasa habanja alata i jasno definisanje porasta sile prodiranja koja figuriše u matematičkom modelu postojanosti kako za prethodnu tako i za završnu obradu. Eksperiment je neophodan iz razloga određivanja parametara obradljivosti koji figurišu u jednačinama (70), (71) dok se vrednost porasta komponenata otpora prodiranja izračunava analitički pre izvođenja eksperimenta, a širina lednog pojasa habanja takođe unapred definiše kao kriterijum habanja i na taj način smanjen je i broj neophodnih eksperimenata što je još jedna od prednosti uspostavljenog matematičkog modela.

## **6. EKSPERIMENTALNA POTVRDA MODELA ZA PREDVIĐANJE SILA REZANJA, POSTOJANOSTI I DISKUSIJA DOBIJENIH REZULTATA**

---

U ovom poglavlju biće izvršena eksperimentalna verifikacija uspostavljenog matematičkog modela. Eksperimentom su obuhvaćena sledeća merenja:

- Merenje glavnog otpora rezanja  $F_1$ , otpora prodiranja  $F_2$  i otpora pomoćnog kretanja  $F_3$  u trenutku kada je alat oštar odnosno kada je širina leđnog pojasa habanja jednaka nuli,
- Merenje širina leđnog pojasa habanja alata  $B_L$  kao i širine leđnog pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini  $B_{L(PL)}$ , za odabrane periode i režime rezanja,
- Merenje porasta glavnog otpora rezanja  $\Delta F_1$ , porasta otpora prodiranja  $\Delta F_2$  i porasta otpora pomoćnog kretanja  $\Delta F_3$  usled postojanja širine leđnog pojasa habanja  $B_L$ ,
- Merenje koeficijenta trenja između leđne površine alata i obrađene površine odnosno pomoćne leđne površine alata i obrađene površine.

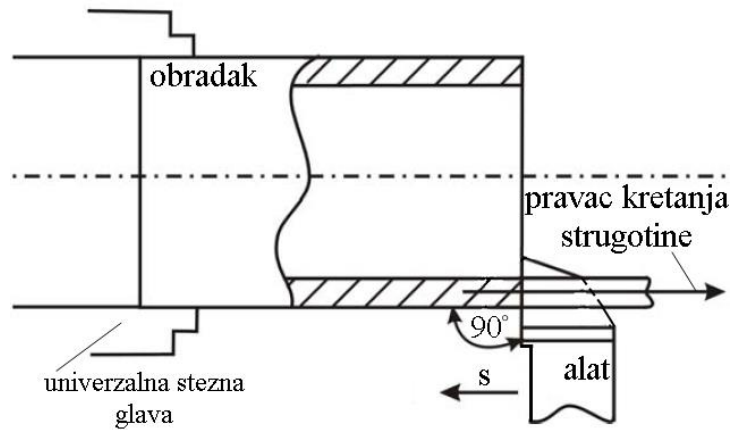
Dobijeni rezultati poslužiće za proveru matematičkog modela koji predviđa:

- Ukupnu silu rezanja koja uzima u obzir poraste sila usled habanja alata,
- Koeficijent trenja između alata i obrađene površine i to na osnovu uspostavljenog matematičkog modela,
- Postojanost alata u proizvodnim uslovima i to za slučajeve prethodne obrade.

Uspostavljeni matematički model znatno bolje predviđa ukupnu silu rezanja kao i postojanost alata od postojećih matematičkih modela.

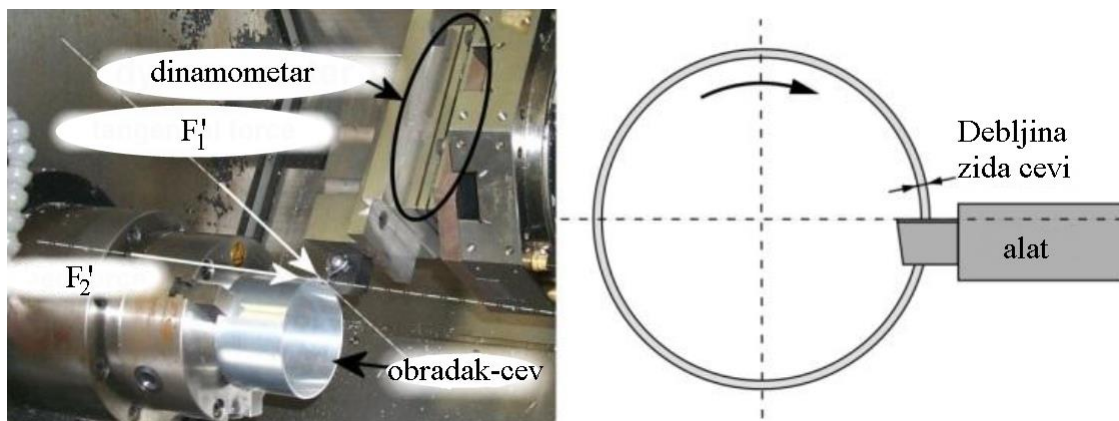
## 6.1 Metodologija i uslovi izvođenja ortogonalnog rezanja pri zahvatu struganja

Istraživanje postojanosti strugarskog noža, habanja kao i merenje otpora rezanja odvija se pri ortogonalnom rezanju koje se terminološki i praktično svodi na uzdužno struganje sa napadnim uglom  $\kappa=90^\circ$  ili na zahvat odsecanja ili usecanja žljeba. Čisto ortogonalno rezanje predstavlja struganje cevastog obratka pri čemu je dužina glavnog sečiva veća od debljine zida cevi, a napadni ugao noža iznosi  $\kappa=90^\circ$ . Ovakva metodologija i uslovi izvođenja eksperimenta figurišu u Merčantovom modelu sila, [68]. Čisto ortogonalno rezanje prikazano je na slici 65.



Slika 65. Čisto ortogonalno rezanje

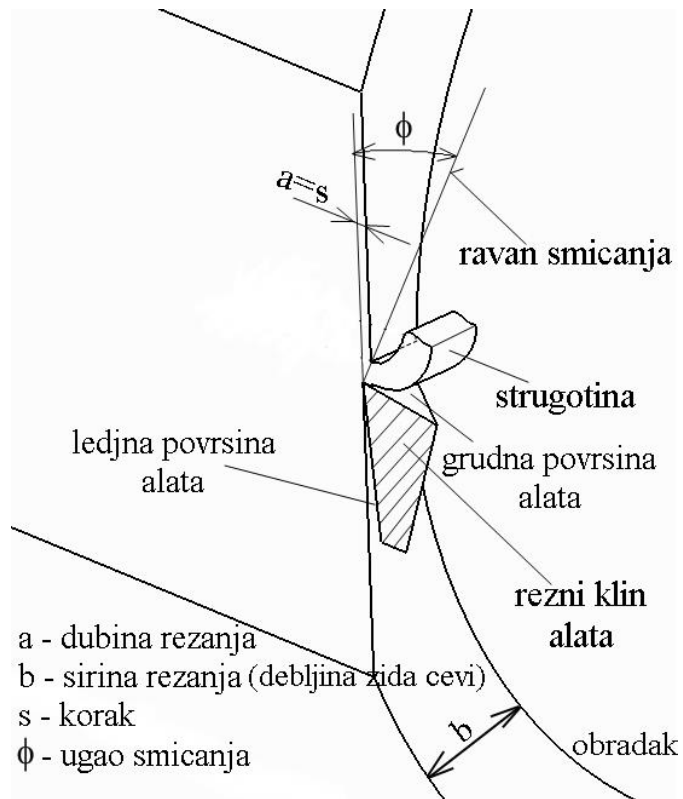
U slučaju čistog ortogonalnog rezanja postoje dva otpora rezanja i to:  $F_1'$  i  $F_2'$ , slika 66.



Slika 66. Otpori rezanja pri čistom ortogonalnom rezanju

Ne bi bila greška da je otpor  $F_2'$  označen i sa  $F_3'$  (praktično komponenta otpora prodiranja je upravna na obrađenu površinu i kolinearna je sa komponentom otpora pomoćnog kretanja-sabiraju se).

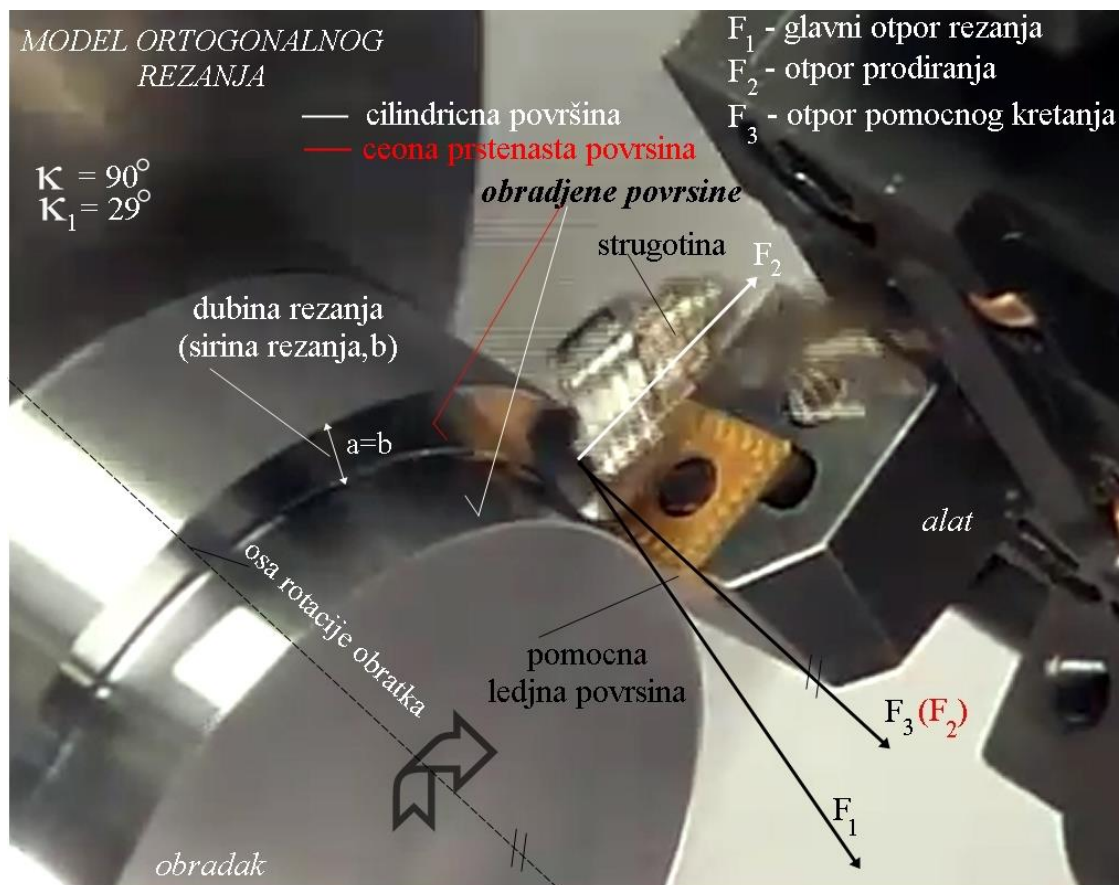
Ono što je jako važno, da pri struganju cevastog obratka, dubina rezanja jednaka je koraku dok širina rezanja odgovara debljini zida cevi, slika 67.



Slika 67. Model čistog ortogonalnog rezanja

Kada se radi o ortogonalnom rezanju pri uzdužnom struganju obratka punog poprečnog preseka napadni ugao noža iznosi  $\kappa = 90^\circ$ , a brzina pomoćnog kretanja alata,  $V_s$ , paralelna je sa osom obratka i normalna na glavno sečivo strugarskog noža, što znači da je kinematska ravan kretanja alata,  $P_f$ , normalna na glavno sečivo kao i da vektor brzine pomoćnog kretanja leži u ravni  $P_f$ .

Na slici 68 prikazan je model ortogonalnog rezanja pri zahvatu uzdužnog struganja koji je snimljen pomoću high speed kamere.



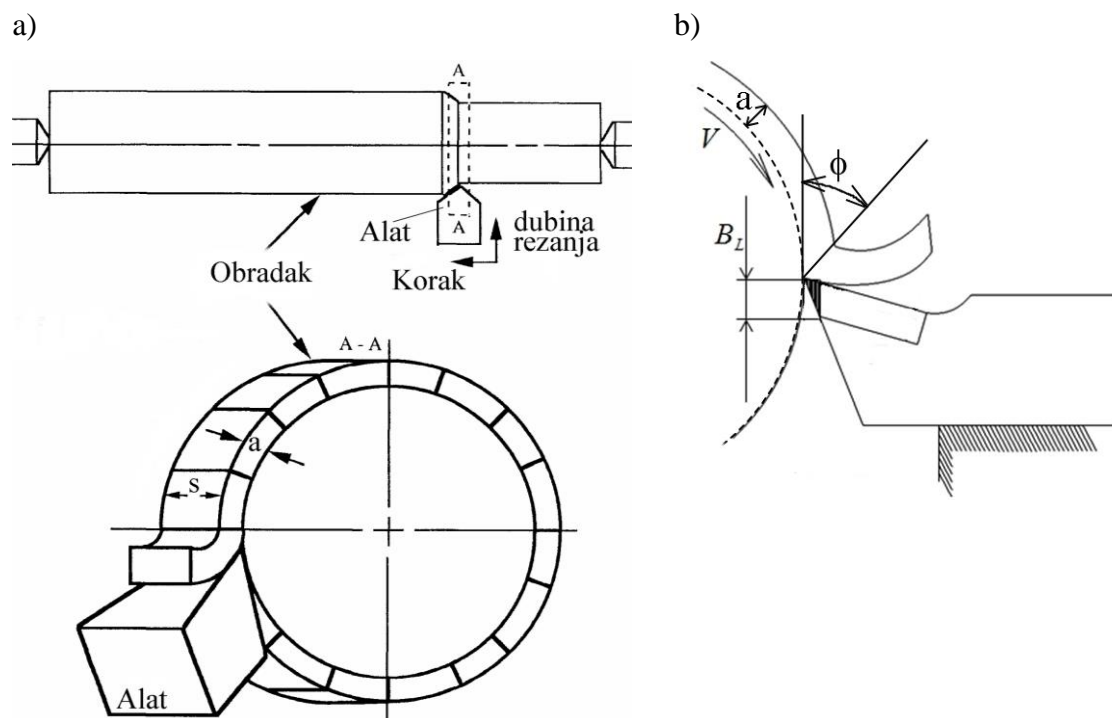
Slika 68. Ortogonalni model rezanja pri uzdužnom struganju snimljen pomoću brze kamere

Sa slike 66 može se videti da glavno sečivo alata praktično formira čeonu prstenastu površinu na obratku i da se na leđnoj površini alata formira širina leđnog pojasa habanja koja se prenosi i na pomoćnu leđnu površinu, pa i na pomoćno sečivo, i zajedno utiču na formiranje cilindrične površine što je i suština uzdužnog struganja.

To znači da u literaturi kada se kaže da iza leđne površine alata ostaje obrađena površina, što je tačno, ostaje u stvari čeona prstenasta površina što znači da su na nju upravni i otpor prodiranja i otpor pomoćnog kretanja i time se može svesti model uzdužnog struganja na čisto ortogonalno rezanje. Zaključuje se da se pri uzdužnom struganju formiraju dve površine i to: čeona prstenasta i cilindrična površina.

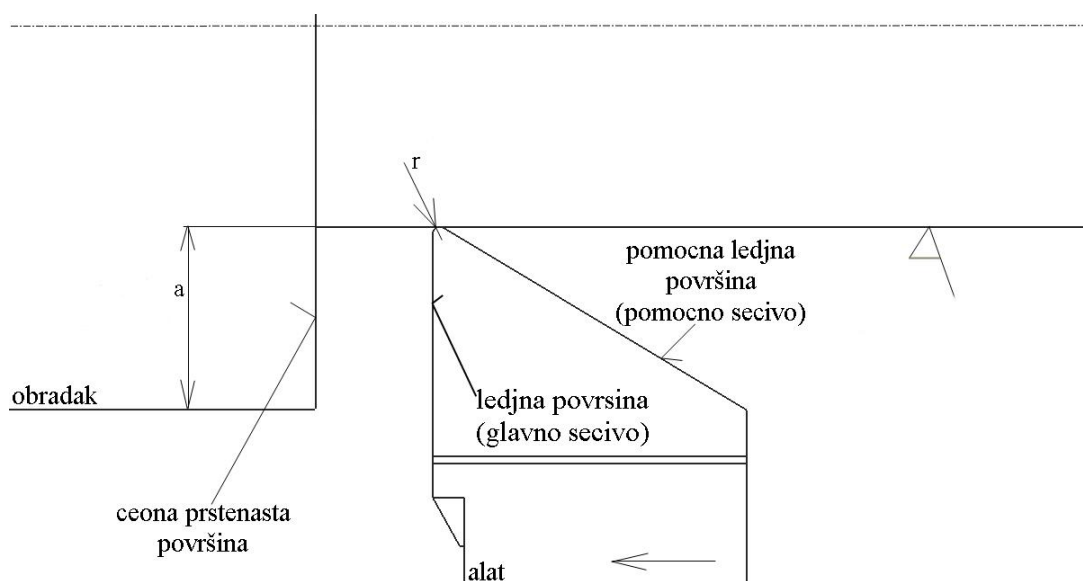
Matematički model ortogonalnog rezanja pri uzdužnom struganju prikazan je na slici 69.





Slika 69. Matematički model ortogonalnog rezanja pri uzdužnom struganju

Pri relativnom kretanju alata ka radnom predmetu pri formiranju obrađene površine uslov je da kretanje paralelno sa vektorom normale na obrađenu površinu ima brzinu nula. Kada se kaže da iza leđne površine ostaje cilindrična obrađena površina misli se na pomoćnu leđnu površinu dok iza leđne površine alata ostaje čeona prstenasta površina, slika 70.



Slika 70. Ortogonalno spoljašnje uzdužno struganje

Širina leđnog pojasa habanja formira se na leđnoj površini alata i zahvata deo pomoćne leđne površine onda se može govoriti o uticaju pomoćne leđne površine na kvalitet obrađene površine (cilindrične).

Na osnovu navedenih konstatacija koje će biti proverene u eksperimentu može se zaključiti da postoji trenje između širine leđnog pojasa habanja, koji je formiran na leđnoj površini alata, i obrađene čelone prstenaste površine kao i trenje između: širine leđnog pojasa habanja alata, koji je formiran na pomoćnoj leđnoj površini, i obrađene cilindrične površine.

Ova teza obuhvata generisanje upotpunjenog modela ortogonalnog rezanja u cilju uspešnog predviđanja postojanosti alata uzimajući u obzir poraste otpora rezanja usled postojanja trenja i habanja.

## 6.2 Faze izvođenja eksperimenta

Uzimajući u obzir veličine koje treba izmeriti eksperimentalni deo ove teze može se podeliti u tri faze:

- Prva faza odnosi se na habanje potpuno novih reznih pločica. Merenja:  $B_L$  i  $B_{L(PL)}$ .
- Druga faza odnosi se na merenje otpora rezanja u slučaju da je alat oštar kao i merenje porasta otpora rezanja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja alata koji su generisani habanjem u prvoj fazi eksperimenta. U ovoj fazi eksperimenta određuju se parametri obradljivosti koji figurišu u uspostavljenim matematičkim modelima,
- Treća faza odnosi se na merenja koeficijenta trenja između alata i obrađene površine,

### 6.2.1. Opšti uslovi izvođenja eksperimenta

U eksperimentu su obrađivani materijali:

- čelik Č4732 (sa tvrdoćom 35 HRc) kao jedan od najčešće korišćenih čelika za izradu mašinskih delova različite konfiguracije. Mere polufabrikata:  $\phi 120 \times 380 \text{mm}$ ,  $\phi 120 \times 125 \text{mm}$ .
- čelik Č6444 (55 HRc). Mere polufabrikata:  $\phi 130 \times 380 \text{mm}$ ,  $\phi 130 \times 125 \text{mm}$ , slika 71.



Slika 71. Pripremljeni materijali za izvođenje eksperimenta

Hemijski sastavi materijala obratka prikazani su u tabeli 9.

Tabela 9. Hemijski sastav materijala obratka

Oznaka materijala obratka	Hemijski sastav %							Tvrdoća [HRc]
	C	Si	Mn	Cr	P	S	M <sub>o</sub>	
Č4732 (42C <sub>r</sub> Mo4)	0.42	-	0.65	1.05	-	-	0.22	35±2
Č6444 (60WC <sub>r</sub> V7)	0.6	0.85	0.3	1.05	-	-	-	55

Pre početka izvođenja eksperimenta pripremak je obrađen toliko da se skine kora i da ima tačnost oblika u aksijalnom i radijalnom preseku, što će u velikoj meri eliminisati pojavu vibracija, slika 72.



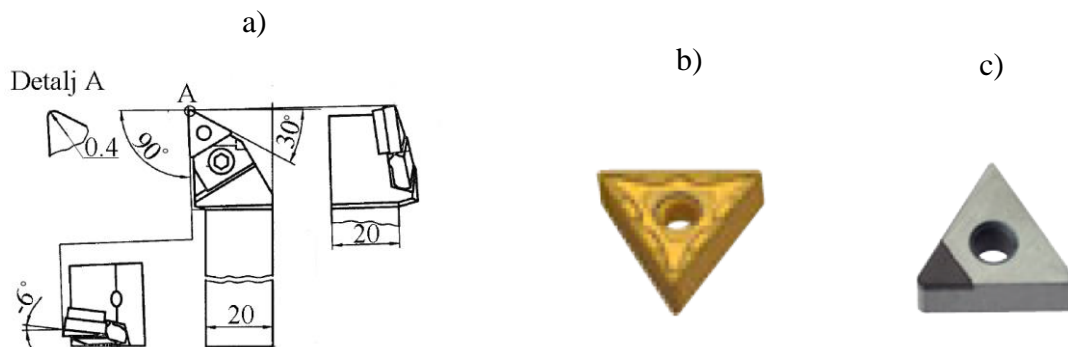
Slika 72. Skidanje kore sa pripremaka

Skidanje kore sa pripremaka urađeno je na svim pripremcima pre termičke obrade. Pri zahvatu skidanja kore korišćen je potpuno drugi strugarski nož od onog koji će se koristiti u drugoj fazi eksperimenta. Nakon skidanja kore pripremcima su termički obrađeni.

U eksperimentu korišćeni su:

- pločica od tvrdog metala TNMG 160404 oslojena (HC6630) proizvođača Atorn. Ove pločice biće korišćene za obradu čelika Č4732,
- pločica od kubnog bornitrida (CBN) TNMA 160404, ABC25/F proizvođača Atorn. Ove pločice biće korišćene za obradu čelika Č6444.

Držač pločica koji je korišćen ima oznaku PTGN proizvođač Han & Kolb. Na slici 73 prikazani su alati korišćeni u eksperimentu.



Slika 73. a) držač pločica PTGN, b) pločica TNMG, c) pločica TNMA CBN

Obradni sistem na kome su izvršeni eksperimenti je univerzalni strug USA Potisje 200 koji ima snagu pogonskog motora  $P_{GK} = 5.5 \text{ kW}$ .

### 6.2.2. Habanje pločica - prva faza eksperimenta

Prva faza eksperimenta odnosi se na habanje pločica pri uzdužnom struganju na dužini od 345 mm sa režimima rezanja prikazanim u tabelama 10 i 11. Eksperimenti su izvođeni pri konstantnoj dubini rezanja od 1 mm pri obradi čelika Č4732 i dubini rezanja 0.15mm pri obradi čelika Č6444.

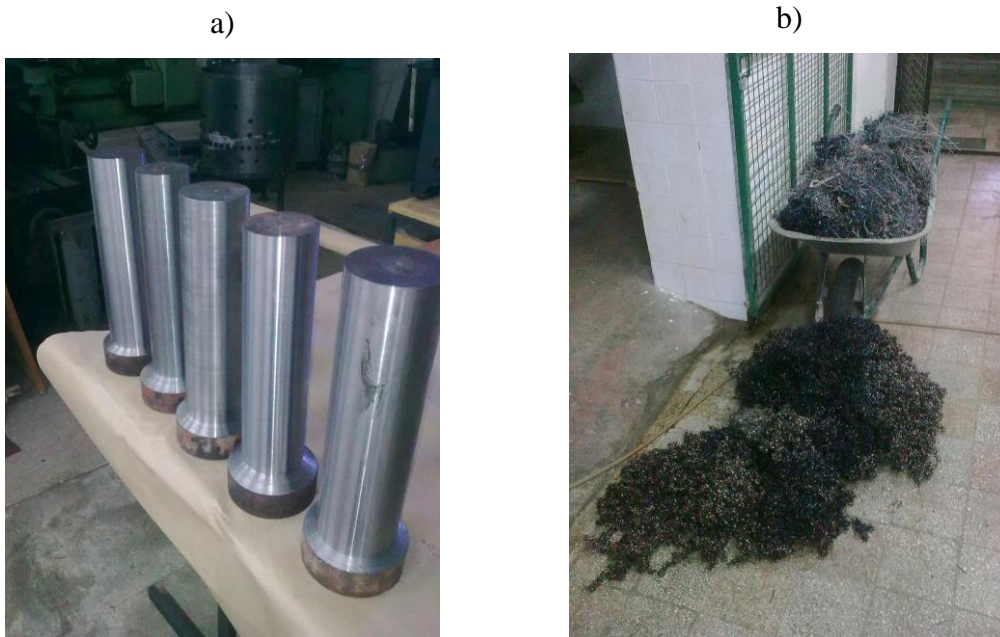
Tabela 10. *Opseg režima rezanja pri obradi Č4732*

<b>Faktori</b>	<b>Minimalna vrednost</b>	<b>Srednja Vrednost</b>	<b>Maksimalna vrednost</b>
$v$ [m/min]	60	90	120
$s$ [mm/ob]	0.196	0.287	0.395
$T$ [ min ]	20	35	50

Tabela 11. *Opseg režima rezanja pri obradi Č6444*

<b>Faktori</b>	<b>Minimalna vrednost</b>	<b>Srednja Vrednost</b>	<b>Maksimalna vrednost</b>
$v$ [m/min]	60	90	120
$s$ [mm/ob]	0.04	0.107	0.181
$T$ [ min ]	20	35	50

Na slici 74 dat je izgled uzoraka nakon završetka struganja prema režimima koji su dati u tabeli 10 i 11.

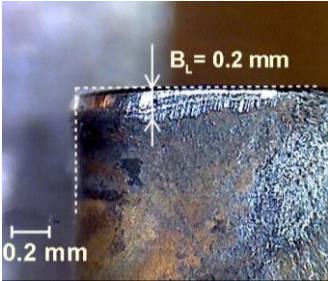
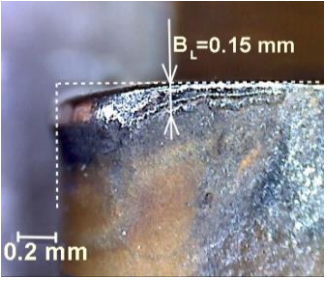
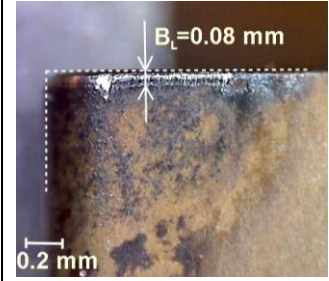
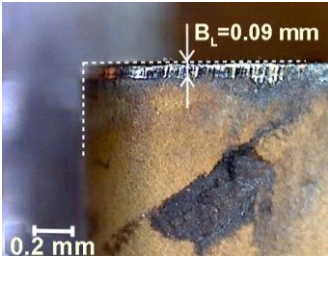
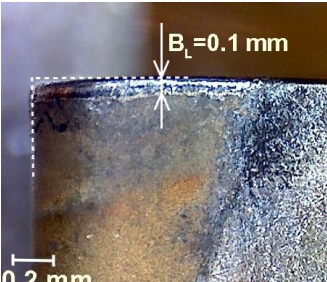
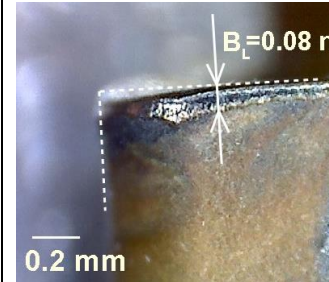
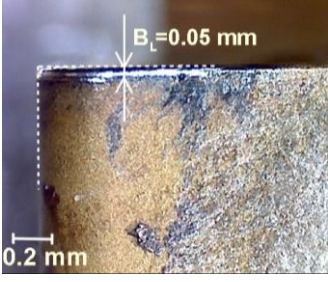
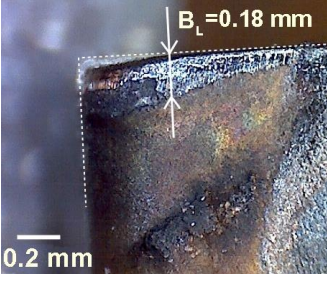
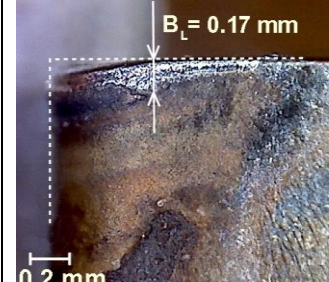


Slika 74. a) izgled uzoraka nakon završenog procesa struganja, b) strugotina

U ovoj fazi eksperimenta analizirano je habanje reznog dela alata strugarskog noža i izvršeno je merenje širine leđnog pojasa habanja  $B_L$  i širine pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini  $B_{L(PL)}$ . Za merenje habanja je korišćen optički mikroskop sa uvećanjem od 20 do 200x, a izmerene vrednosti prikazane su u tabeli 12.



Tabela 12. Merenje širine leđnog pojasa habanja rezne pločice TNMG pri obradi čelika č4732.

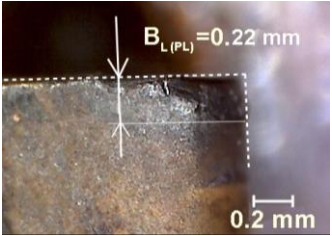
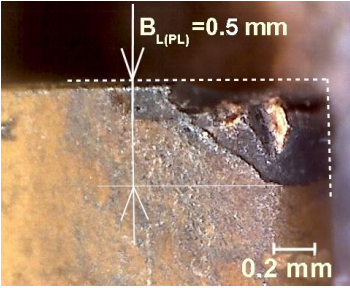
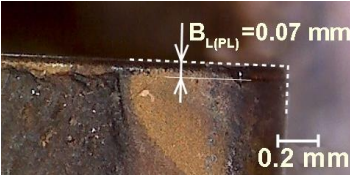
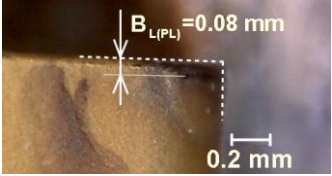
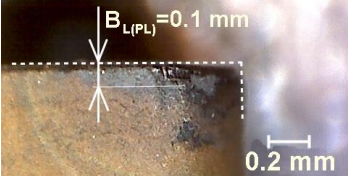
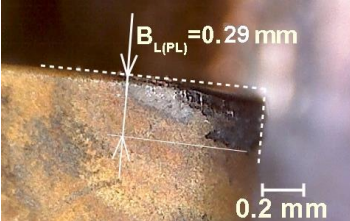
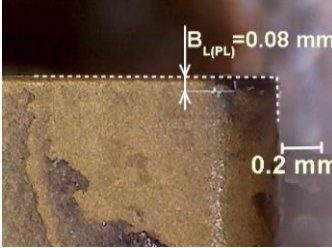
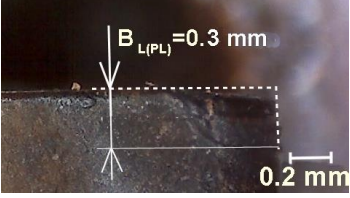
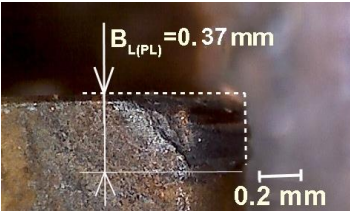
<p>V=120 m/min; s= 0.39 mm/o t=50 min</p>  <p><math>B_L = 0.2 \text{ mm}</math></p> <p>0.2 mm</p>	<p>V=120 m/min; s= 0.395mm/o t=20 min</p>  <p><math>B_L = 0.15 \text{ mm}</math></p> <p>0.2 mm</p>	<p>V=120 m/min; s= 0.196 mm/o t=50 min</p>  <p><math>B_L = 0.08 \text{ mm}</math></p> <p>0.2 mm</p>
<p>V=60 m/min; s= 0.196 mm/o t=50 min</p>  <p><math>B_L = 0.09 \text{ mm}</math></p> <p>0.2 mm</p>	<p>V=60 m/min; s= 0.395 mm/o t=50 min</p>  <p><math>B_L = 0.1 \text{ mm}</math></p> <p>0.2 mm</p>	<p>V=60 m/min; s= 0.395 mm/o t=20 min</p>  <p><math>B_L = 0.08 \text{ mm}</math></p> <p>0.2 mm</p>
<p>V=60 m/min; s= 0.196 mm/o t=20 min</p>  <p><math>B_L = 0.05 \text{ mm}</math></p> <p>0.2 mm</p>	<p>V=90 m/min; s= 0.287 mm/o t=35 min</p>  <p><math>B_L = 0.18 \text{ mm}</math></p> <p>0.2 mm</p>	<p>V=90 m/min; s= 0.287 mm/o t=35 min</p>  <p><math>B_L = 0.17 \text{ mm}</math></p> <p>0.2 mm</p>

Na osnovu izmerenih vrednosti može se zaključiti da je maksimalna širina leđnog pojasa habanja  $B_L = 0.2 \text{ mm}$ , minimalna  $B_L = 0.05 \text{ mm}$ , srednja  $B_L = 0.1 \text{ mm}$ .

Na  $B_L$  ima dominantan uticaj: dubina rezanja i trenje između čelone prstenaste površine obratka i leđne površine alata.

Na identičnim pločicama izvršeno je merenje širine pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini alata, a rezultati merenja prikazani su u tabeli 13.

Tabela 13. *Merenje širine pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini alata pri obradi čelika č4732 koristeći reznu pločicu TNMG.*

<p>V=120 m/min; s= 0.39 mm/o t=50 min</p> 	<p>V=120 m/min; s= 0.395mm/o t=20 min</p> 	<p>V=120 m/min; s= 0.196 mm/o t=50 min</p> 
<p>V=60 m/min; s= 0.196 mm/o t=50 min</p> 	<p>V=60 m/min; s= 0.395 mm/o t=50 min</p> 	<p>V=60 m/min; s= 0.395 mm/o t=20 min</p> 
<p>V=60 m/min; s= 0.196 mm/o t=20 min</p> 	<p>V=90 m/min; s= 0.287 mm/o t=35 min</p> 	<p>V=90 m/min; s= 0.287 mm/o t=35 min</p> 

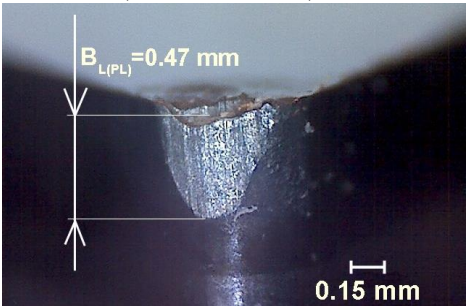
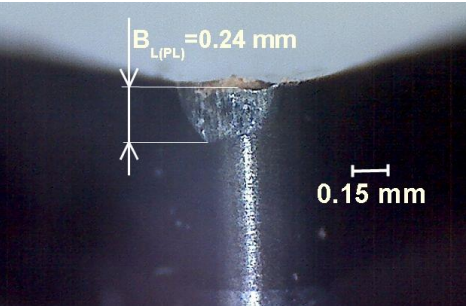
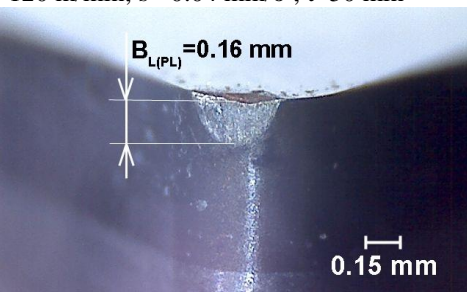
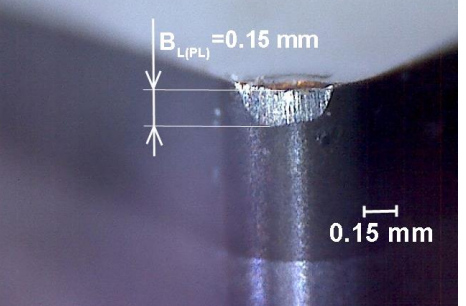
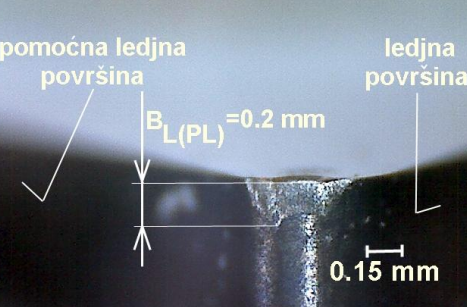
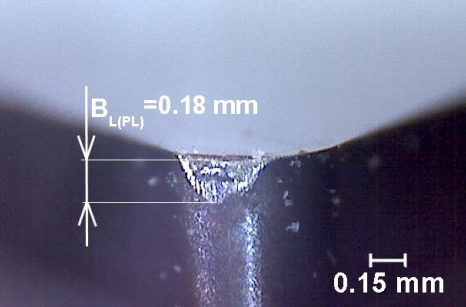
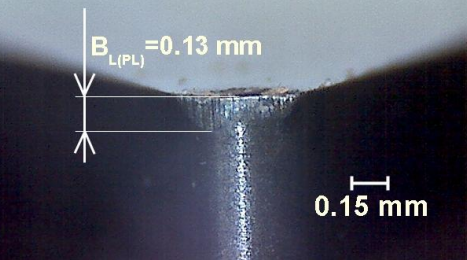
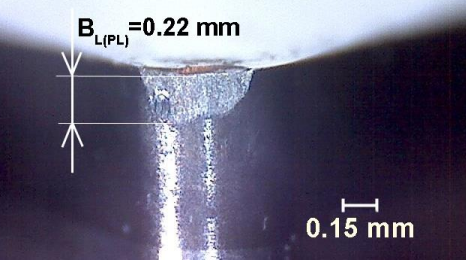
Uočene su tri važne vrednosti širine pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini: maksimalna širina pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini  $B_{L(PL)} = 0.5\text{ mm}$ , minimalna  $B_{L(PL)} = 0.07\text{ mm}$  i srednja  $B_{L(PL)} = 0.18\text{ mm}$ .

Na  $B_{L(PL)}$  ima dominantan uticaj: otpor prodiranja i trenje između obrađene cilindrične površine i pomoćne leđne površine alata.

Eksperimentalni rezultati izmerenih vrednosti širine pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini nastale pri obradi čelika č6444, prikazani su u tabeli 14.



Tabela 14. Merenje širine pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini alata pri obradi čelika č6444 pomoću rezne pločice TNMA.

<p>V=120 m/min; s= 0.181 mm/o ; t=50 min</p> 	<p>V=120 m/min; s= 0.181 mm/o ; t=20 min</p> 
<p>V=120 m/min; s= 0.04 mm/o ; t=50 min</p> 	<p>V=120 m/min; s= 0.04 mm/o ; t=20 min</p> 
<p>V=60 m/min; s= 0.181 mm/o ; t=20 min</p> 	<p>V=60 m/min; s= 0.04 mm/o ; t=50 min</p> 
<p>V= 90 m/min; s= 0.107 mm/o ; t=35 min</p> 	<p>V=90 m/min; s= 0.107 mm/o ; t=35 min</p> 

Zbog male dubine rezanja došlo je do pomeranja pojasa habanja ka pomoćnoj leđnoj površini.

### 6.2.3. Određivanje matematičkih modela postojanosti, širine leđnog pojasa habanja alata i otpora rezanja. Merenje otpora rezanja. Odnos između komponenti otpora rezanja pri ortogonalnom rezanju – druga faza eksperimenta

Cilj eksperimenta je formiranje matematičkih modela sa što manjim brojem eksperimenata i to:

- Matematički model promene širine leđnog pojasa habanja alata:

$$B_L = K_1 \cdot V^{p_1} \cdot s^{q_1} \cdot T^{y_1} \quad (89)$$

- Matematički model postojanosti u slučaju završne obrade:

$$T = K_3 \cdot V^{p_3} \cdot s^{q_3} \cdot B_L^{y_3} \quad (90)$$

- Matematički model promene porasta glavnog otpora rezanja  $\Delta F_1$ , za  $B_L \neq 0$ :

$$\Delta F_1 = K_4 \cdot V^{p_4} \cdot s^{q_4} \cdot B_L^{y_4} \quad (91)$$

- Matematički model porasta glavnog otpora prodiranja  $\Delta F_2$ , za  $B_L \neq 0$ :

$$\Delta F_2 = K_5 \cdot V^{p_5} \cdot s^{q_5} \cdot B_L^{y_5} \quad (92)$$

- Matematički model promene ukupnog glavnog otpora rezanja  $F_{1_{UK}}$  :

$$F_{1_{UK}} = K_6 \cdot V^{p_6} \cdot s^{q_6} \cdot B_L^{y_6} \quad (93)$$

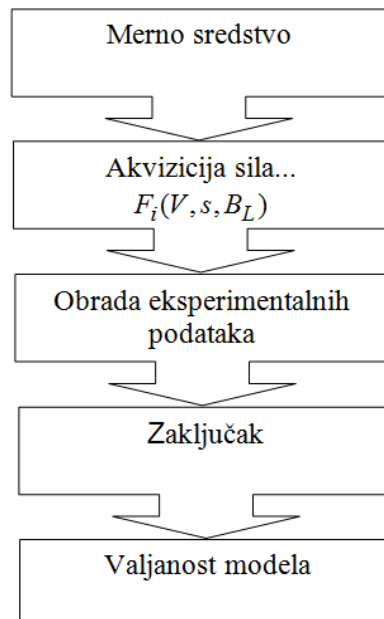
- Matematički model promene ukupnog otpora prodiranja  $F_{2_{UK}}$  :

$$F_{2_{UK}} = K_7 \cdot V^{p_7} \cdot s^{q_7} \cdot B_L^{y_7} \quad (94)$$

gde su:  $p_i, q_i, y_i, i=1...7$  - parametri obradljivosti;  $K_i, i=1...7$  -konstante;  $V, s, B_L, \Delta F_2$  uticajni faktori;  $t$ - period rezanja.

Pomenuti faktori predstavljaju podskup faktora iz skupa svih veličina koje se nalaze u okruženju koji utiču (značajni su) na posmatranu veličinu u našem slučaju postojanost, širinu leđnog pojasa habanja i otpore rezanja. Uticajni faktori i njihovo rangiranje detaljno su opisani u poglavlju 3. Model je zapravo odgovarajuća funkcija koja povezuje posmatranu fizičku veličinu i na nju uticajne veličine.

Struktura (neophodni koraci) koju je potrebno poštovati kako bi se došlo do pomenutih matematičkih modela data ja na slici 75.



Slika 75. Neophodni koraci za formiranje matematičkih modela

Pretpostavljeni modeli imaju stepeni oblik (najčešće pretpostavljeni oblik modela) koji se logaritmovanjem svodi na zbir (linearnu regresiju) i onda se prave linearni modeli za proces i to što se dobija propisuje se na kom intervalu važi:

$$B_L = K_1 \cdot V^{p_1} \cdot s^{q_1} \cdot T^{y_1} \quad (95)$$

$$\ln B_L = \ln K_1 + p_1 \ln V + q_1 \ln s + y_1 \ln T \quad (96)$$

Iz jednačine 89 dobija se jednostavna linearna funkcija:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 \quad (97)$$

To podrazumeva neophodnost formiranja trofaktornog plana eksperimenta (pronaći funkciju od 3 nezavisne). Kod ovako postavljenog oblika neophodno je da uz faktore stoje i odgovarajući koeficijenti modela ( $a_0, a_1, a_2, a_3$ ). Koeficijenti nisu poznati i njih je potrebno odrediti eksperimentom, dok su faktori ( $x_1, x_2, x_3$ ) veličine koje se zadaju eksperimentom i predstavljaju elemente režima rezanja.

Uslovi koje plan eksperimenta treba da zadovolji su: ortogonalnost, normiranost i simetričnost.

Svi proračuni bazirani su na *metodi najmanjih kvadrata*, to jest na ideji da *zbir kvadrata greške svih eksperimenata treba da bude minimalan*. Ovo znači da poredi stvaran dobijen rezultat sa teorijskim, koji odgovaraju linearnoj regresiji. Matematički oblik pomenute metode ima oblik:

$$S = \sum_{j=1}^n \Delta_j^2 \rightarrow \min \Rightarrow \sum_{j=1}^n (\varphi_j - C_j)^2 \rightarrow \min \quad (98)$$

gde su:  $S$  - zbir kvadrata greške,  $\Delta_j$  - greška određenog eksperimenta,  $\varphi_j$  - vrednost funkcije pod pretpostavkom da je model idealan (linearna zavisnost),  $C_j$  - Vrednost koja je dobijena eksperimentom.

Postavlja se pitanje kako na osnovu metode najmanjih kvadrata odrediti nepoznate koeficijente:  $a_1, \dots, a_j, \dots, a_m$ . Odgovor leži u određivanju minimuma diferencijala funkcije  $S$  po pojedinim koeficijentima:  $a_1, \dots, a_j, \dots, a_m$ , a potom ono što je tako dobijeno (za svaki eksperiment) izjednačiti sa nulom.

Funkcija  $S$  se može napisati kao:

$$\begin{aligned} S = & (a_1 x_{11} + \dots + a_i x_{i1} + \dots + a_m x_{m1} - C_1)^2 + \dots + \\ & + (a_1 x_{1j} + \dots + a_i x_{ij} + \dots + a_m x_{mj} - C_j)^2 + \dots + \\ & + (a_1 x_{1n} + \dots + a_i x_{in} + \dots + a_m x_{mn} - C_n)^2 \end{aligned} \quad (99)$$

pa su uslovi:

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial a_i} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0 \quad (100)$$

Dobijaju se sledeće jednačine oblika:

$$\begin{aligned} & 2 \cdot (a_1 x_{11} + \dots + a_i x_{i1} + \dots + a_m x_{m1} - C_1) \cdot x_{11} + \dots + \\ & + 2 \cdot (a_1 x_{1j} + \dots + a_i x_{ij} + \dots + a_m x_{mj} - C_j) \cdot x_{1j} + \dots + \\ & + 2 \cdot (a_1 x_{1n} + \dots + a_i x_{in} + \dots + a_m x_{mn} - C_n) \cdot x_{1n} = 0 \end{aligned} \quad (101)$$

Nakon dobijanja preostalih jednačina za sve eksperimente, i nakon sređivanja jednačina po principu prebacivanja srodnih članova na istu stranu, dobija se novih  $m$  jednačina:

$$\begin{aligned} a_1 \cdot \sum_{j=1}^m x_{1j} \cdot x_{1j} + \dots + a_i \cdot \sum_j x_{1j} \cdot x_{ij} + \dots + a_m \cdot \sum_j x_{1j} \cdot x_{mj} &= \sum_j C_j \cdot x_{1j} \\ a_1 \cdot \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot x_{1j} + \dots + a_i \cdot \sum_j x_{ij} \cdot x_{ij} + \dots + a_m \cdot \sum_j x_{ij} \cdot x_{mj} &= \sum_j C_j \cdot x_{ij} \end{aligned} \quad (102)$$

$$a_1 \cdot \sum_{j=1}^m x_{mj} \cdot x_{1j} + \dots + a_i \cdot \sum_j x_{mj} \cdot x_{ij} + \dots + a_m \cdot \sum_j x_{mj} \cdot x_{mj} = \sum_j C_j \cdot x_{mj}$$

Može se zaključiti da je posmatrani sistem jednačina izrazito složen. Ukoliko se radi o dvo, ili trofaktornim eksperimentima on bi se jednostavno rešavao, ali kako se povećava

broj faktora nastali bi problemi. Danas postoji niz softverskih paketa, koji automatizuju čitav proračun kao što je (TRIPDS-domaći softver koji omogućava brzu obradu podataka. Softver je korišćen u okviru predmeta Akvizicija i obrada eksperimentalnih podataka).

Sledeći korak odnosi se na kodiranje i dekodiranje eksperimenta i navode se osnovna pravila za kodiranje. Polazi se od linearne funkcije 94 i potrebno je kodirati originalni plan eksperimenta tako da zadovolji tri pomenuta ulova i dobija se model sa kodiranim vrednostima:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 \quad (103)$$

Sa kodiranim vrednostima faktora  $X_1, X_2, X_3$  model je drugačiji. Pravilo po kome se kodiranje vrši je sledeće:

$$X_i = 2 \cdot \frac{\ln f_i - \ln f_{i \max}}{\ln f_{i \max} - \ln f_{i \min}} + 1 \quad (104)$$

gde je  $i = 1, 2, 3$

$$\text{Za: } f_i = f_{i \max} \Rightarrow X_i = +1$$

$$f_i = f_{i \min} \Rightarrow X_i = -1.$$

Konvencijom se za sredinu plana eksperimenta usvaja da je  $X_{sr}$  geometrijska sredina, koje se tek logaritmovanjem prevodi u aritmetičku sredinu. Prema uslovu ortogonalnosti:

$$X_{sr} = \sqrt{X_{\min} \cdot X_{\max}} \quad (105)$$

Polazeći od izraza za matematičke modele 86-90 pravilo za dekodiranje je sledeće:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{12} X_0 y_{Mj}; b_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^8 X_{1j} y_{Mj}; \quad (106)$$

$$b_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^8 X_{2j} y_{Mj}; b_3 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^8 X_{3j} y_{Mj}$$

odnosno

$$a_0 = b_0 + b_1 + b_2 + b_3 - 2 \left( b_1 \frac{\ln f_{1 \max}}{\ln \frac{f_{1 \max}}{f_{1 \min}}} + b_2 \frac{\ln f_{2 \max}}{\ln \frac{f_{2 \max}}{f_{2 \min}}} + b_3 \frac{\ln f_{3 \max}}{\ln \frac{f_{3 \max}}{f_{3 \min}}} \right) \quad (107)$$

$$a_1 = \frac{2b_1}{\ln \frac{f_{1\max}}{f_{1\min}}}; a_2 = \frac{2b_2}{\ln \frac{f_{2\max}}{f_{2\min}}}; a_3 = \frac{2b_3}{\ln \frac{f_{3\max}}{f_{3\min}}}$$

### Plan trofaktornog eksperimenta

Kao što je prethodno objašnjeno, postoje uslovi koje plan mora da zadovolji, kako bi se izvršilo uprošćavanje sistema jednačina i primenio princip kodiranja i dekodiranja. To su: ortogonalnost, normiranost, simetričnost.

Kao što rečeno radi se o trofaktornom planu eksperimenta:

- $k = 3, (V, s, B_L, (\Delta F_2))$
- promena faktora je na dva nivoa (min; max); ( $sr \equiv 0$ ),
- broj potrebnih eksperimenata ( $n$ )  $n = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^k = 8$
- za proveru dobijenih modela na osnovu  $n$  eksperimenata radi se još  $n_0 = \frac{n}{2}$  eksperimenata,
- $n_0$  - obično se ponavlja sa srednjim vrednostima faktora.

To znači da je neophodno sprovesti ukupno dvanaest eksperimenata čiji je plan prikazan u tabeli 15.

Tabela 15. Plan eksperimenta sa kodiranim nivoima faktora

Broj eksperimenta	F A K T O R I				Rezultati merenja:
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y = \ln B_L; Y = \ln T \dots$
1	1	+1	+1	+1	
2	1	+1	+1	-1	
3	1	+1	-1	+1	
4	1	+1	-1	-1	
5	1	-1	+1	+1	
6	1	-1	+1	-1	
7	1	-1	-1	+1	
n=8	1	-1	-1	-1	
9	1	0	0	0	
10	1	0	0	0	
11	1	0	0	0	
N=12	1	0	0	0	

### Provera adekvatnosti i signifikantnosti modela

Da bi usvojeni oblik modela zavisnosti od odabranih faktora bio adekvatan potrebno je da izračunata vrednost  $F_{rLF}$  (za stepene slobode  $f_{LF} = 5$  i  $f_E = 3$ ) bude manja od tablične

vrednosti  $F_t(f_L=5, f_E=3) = 9,01$ , a to znači da izmerena vrednost merene veličine odstupa od računске vrednosti dobijene iz modela za vrednost  $\pm 2S_e$  (disperzija rezultata eksperimenta u centralnoj tački) sa verovatnoćom  $P = 0,95$  odnosno:

$$F_{rLF} < F_t(f_{LF}, f_E) = 9.01 \text{ sa verovatnoćom od } 95\% \quad (108)$$

Ukoliko je računска vrednost veličine  $F_{rLF}$  manja od tablične vrednosti  $F_t = 9,01$  onda se može zaključiti da je usvojeni oblik modela adekvatan.

Za ocenu signifikantnosti faktora zavisnosti potrebno je ispuniti sledeće uslove:

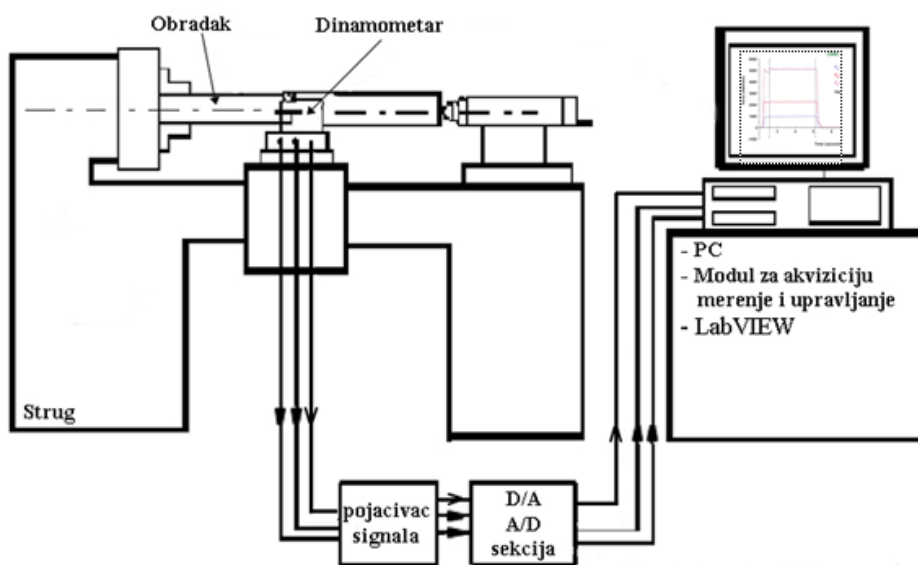
$$F_{r_i} > F_t(f_i, f_E) > 10.13 \quad (109)$$

### Merenje otpora rezanja

Pre određivanja matematičkih modela neophodno je izmeriti otpore rezanja. To znači da je neophodno izmeriti otpore rezanja kada je alat potpuno oštar i kada je zatupljen.

Kada se kaže zatupljen alat misli se na zatupljenja koja su generisana u prvoj fazi eksperimenta. Na ovaj način, iz jednačina 55 i 56, mogu se lako izračunati porasti otpora rezanja koji učestvuju u matematičkim modelima.

Merenja otpora rezanja vrše se pri zahvatu uzdužnog struganja alatom koji je prikazan na slici 73. Šema instalacije za merenje sila rezanja prikazana je na slici 76.

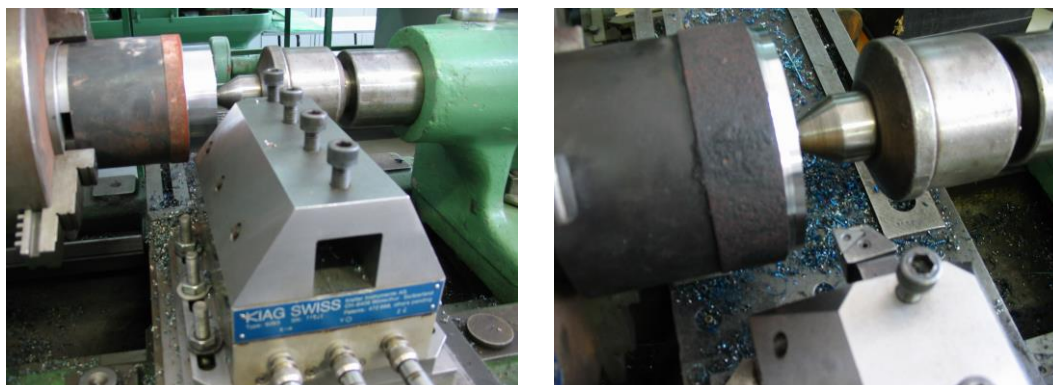


Slika 76. Šema instalacije za merenje otpora rezanja

Na slici 77 je prikazan deo ispitivanja na kojem se vidi stegnut alat na trokomponentnom dinamometru (Kistler Kiag Svis model 9263). Za merenja se koristi



kapacitivni pojačivač (Kistler-5001), akviziviona kartica (ED-429-UP) i programski paket Labview, slika 78.



Slika 77. Trokomponentni dinamometar – Kistler Kiag Svis model 9263

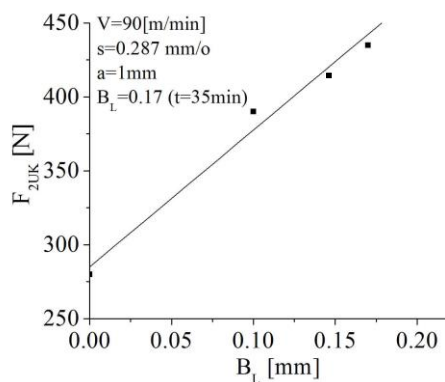
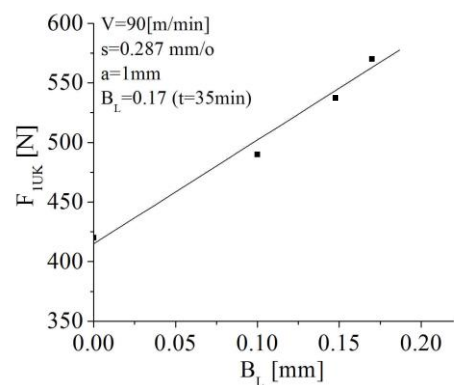
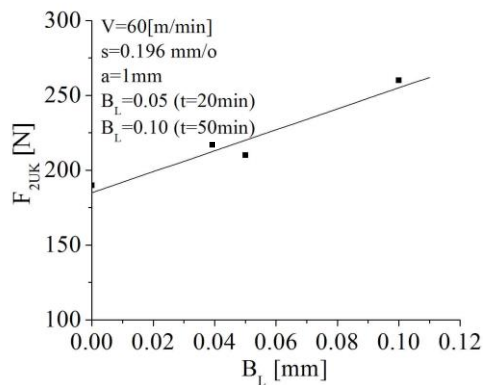
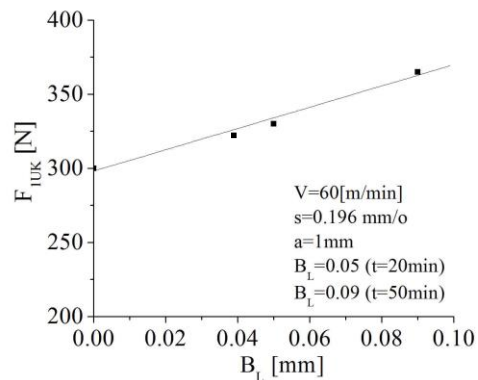
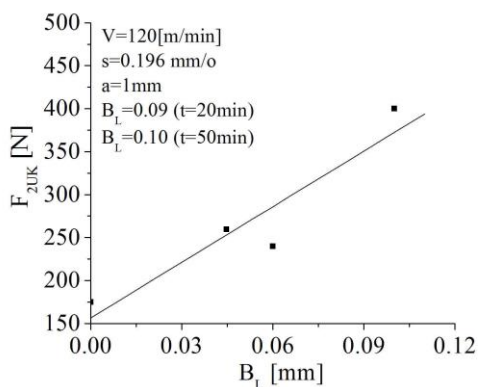
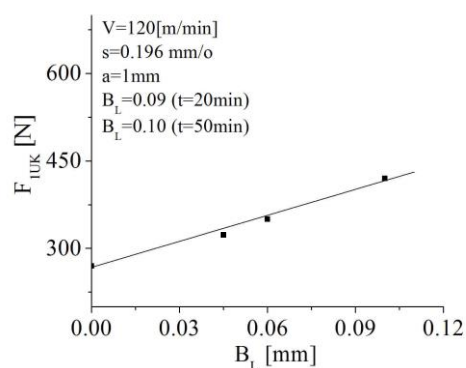
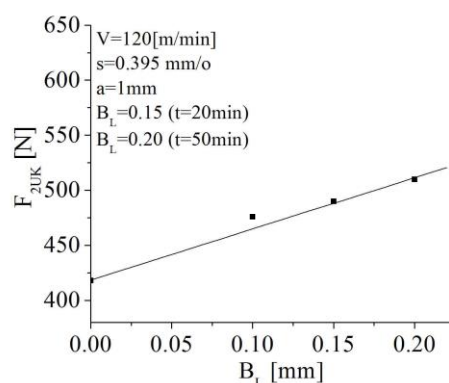
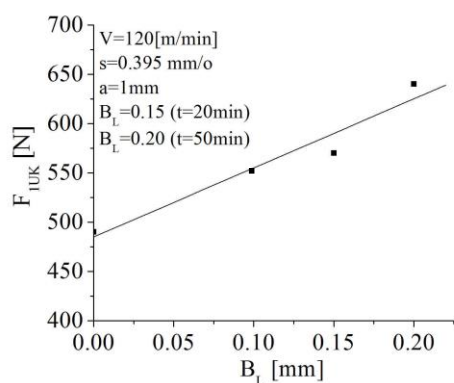
Tokom zahvata uzdužnog struganja dinamometar meri silu u tri pravca, a dobijeni signal se pojačava preko kapacitivnog pojačivača zatim se vrši njegova konverzija iz analognog u digitalni signal (pomoću akvizicione kartice) i umesto analognog pokazivača koristi se računar sa programskim paketom Labview pomoću koga se vrši prikazivanje, obrada i memorisanje rezultata merenja u ovom slučaju komponenti otpora rezanja, slika 78.



Slika 78. Prikaz dela opreme za merenje otpora rezanja pri struganju: kapacitivni pojačivač, akviziviona kartica i program Labvju

Na slici 79 su prikazani rezultati merenja otpora rezanja za određene uslove obrade, datim u tabelama 10 i 11.





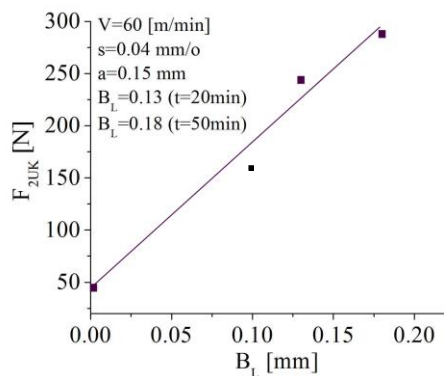
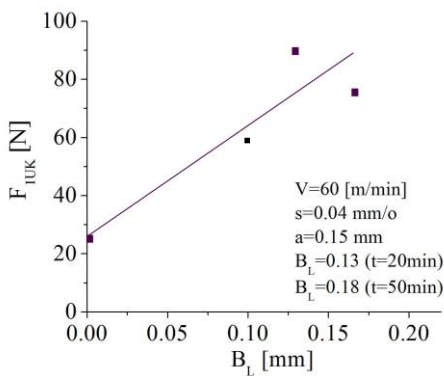
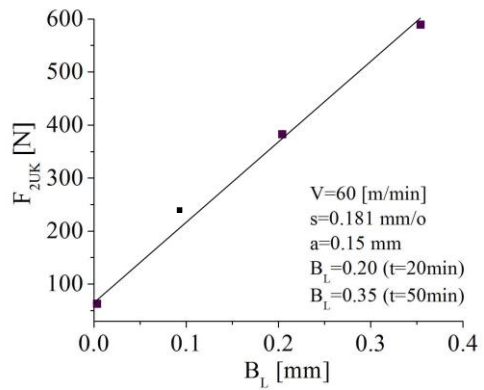
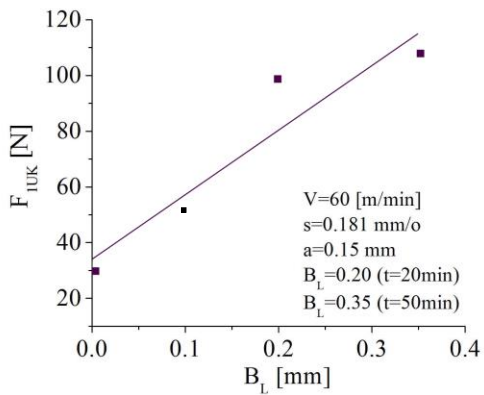
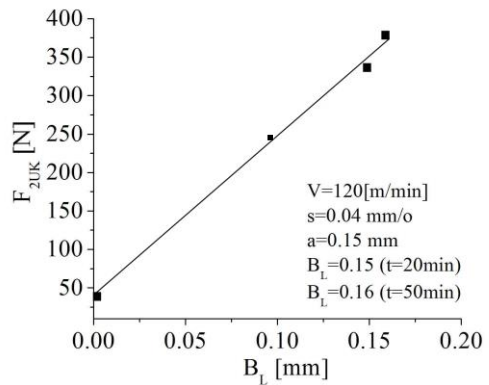
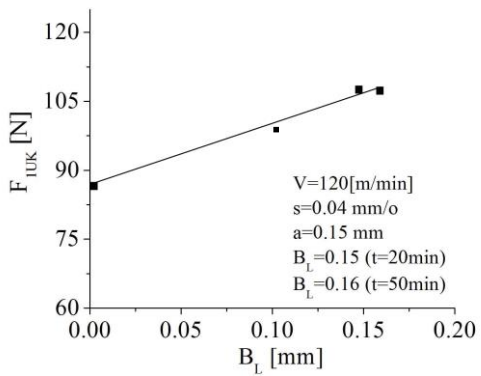
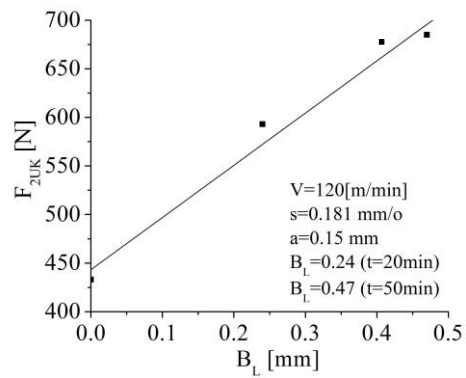
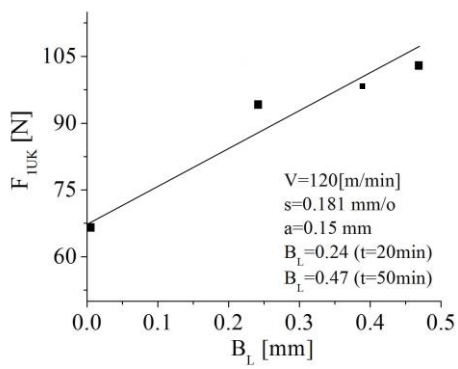
Slika 79 . Zavisnost otpora rezanja u funkciji  $B_L$  pri obradi Č4732

Sa slike 79 može se zaključiti sledeće:

- Glavni otpor rezanja veći je od otpora prodiranja, u pojedinim slučajevima, za 40 %,
- Otpori rezanja linearno rastu sa porastom  $B_L$ ,
- Otpor prodiranja uticajniji je na promenu  $B_L$  u odnosu na glavni otpor rezanja.
- Otpor prodiranja ima veći porast u odnosu na glavni otpor rezanja pri povećanju  $B_L$ . U pojedinim slučajevima otpor prodiranja povećava se čak i do 55% dok se glavni otpor rezanja povećao za 35 % (pri  $B_L = 0.17 \text{ mm}$ )
- Intenzitet otpora rezanja opada pri smanjenju koraka,
- Na dijagramima označeno je za koje vreme rezanja se generiše odgovarajući  $B_L$ ,
- U većini slučajeva otpori rezanja počinju naglo da rastu nakon perioda rezanja  $t=20 \text{ min}$ . Sa dijagrama lako se mogu očitati vrednosti otpora rezanja za slučaj kada je alat oštar odnosno  $B_L = 0 \text{ mm}$  i za zatupljen alat sa  $B_{L_{doz}}$
- Uzimajući u obzir da je  $B_{L_{doz}} = 0.4 - 0.5 \text{ mm}$  kriterijum zatupljenosti alata zaključuje se da je postojanost alata  $T=50 \text{ min}$  i da je iskorišćenje alata bolje kada se biraju koraci koji se kreću u opsegu  $s [0.04 \text{ mm/o} - 0.2 \text{ mm/o}]$ .

Merenja otpora rezanja pri obradi čelika Č6444 pri režimima obrade koji su dati u tabeli 12, prikazani su na slici 80 sa koje se može zaključiti:

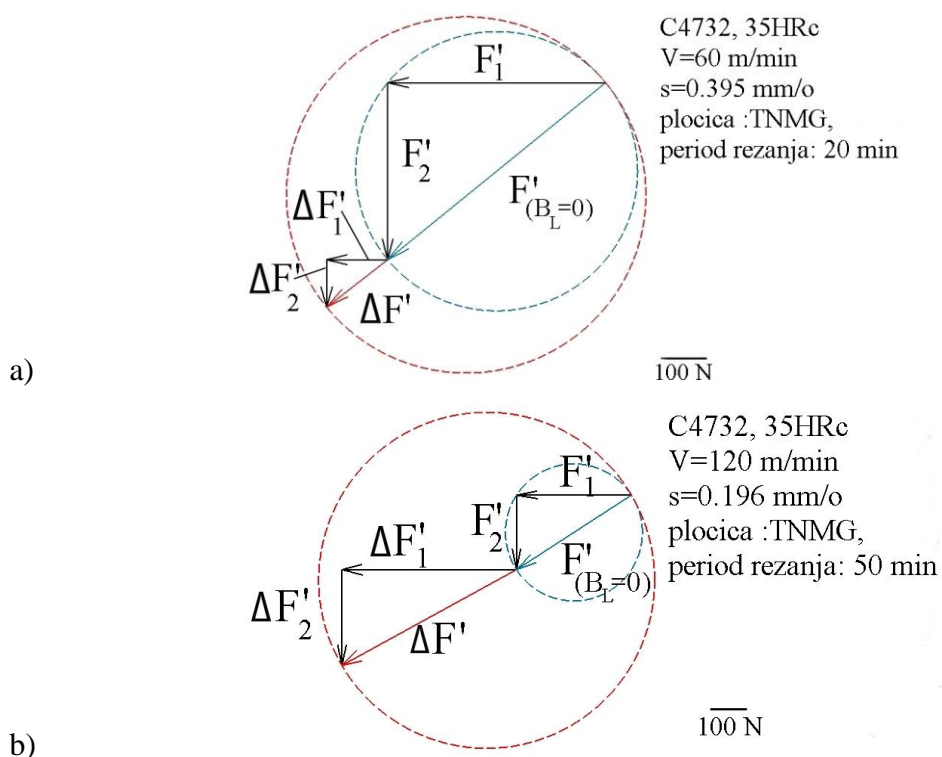
- Otpor prodiranja je veći je od glavnog otpora rezanja što je uslovljeno velikom tvrdoćom obratka,
- Otpori rezanja linearno rastu sa porastom  $B_L$ ,
- Otpor prodiranja ima veći porast u odnosu na glavni otpor rezanja pri povećanju  $B_L$ . U pojedinim slučajevima otpor prodiranja povećava se čak i do 700% dok se glavni otpor rezanja povećao za 310 % (pri  $B_L = 0.35 \text{ mm}$ ). Ako se posmatraju porasti otpora rezanja pri  $B_{L_{doz}} = 0.2 \text{ mm}$  u tom slučaju otpor prodiranja se povećao za 530% dok se glavni otpor rezanja povećao za 250%.
- Intenzitet otpora rezanja opada pri smanjenju koraka,
- Uočava se linearna zavisnost između otpora prodiranja i  $B_L$ ,
- Uzimajući u obzir da je  $B_{L_{doz}} = 0.2 \text{ mm}$  kriterijum zatupljenosti alata zaključuje se da je postojanost alata  $T=20 \text{ min}$ .



Slika 80 . Zavisnost otpora rezanja u funkciji  $B_L$  pri obradi Č6444

## Odnos između komponenti sila-otpora rezanja pri ortogonalnom rezanju

Polazeći od postavljenog matematičkog modela, detaljno opisanog u poglavlju 5, koji upotpunjava Merčantov model sila kao i pretpostavke da je ugao  $\zeta \approx 0^\circ$ , na slici 81 prikazani su, u odgovarajućoj razmeri, odnosi komponenata otpora rezanja pri uzdužnom ortogonalnom struganju (posmatra se cilindrična obrađena površina osim ako to nije drugačije naznačeno) za različite režime rezanja.

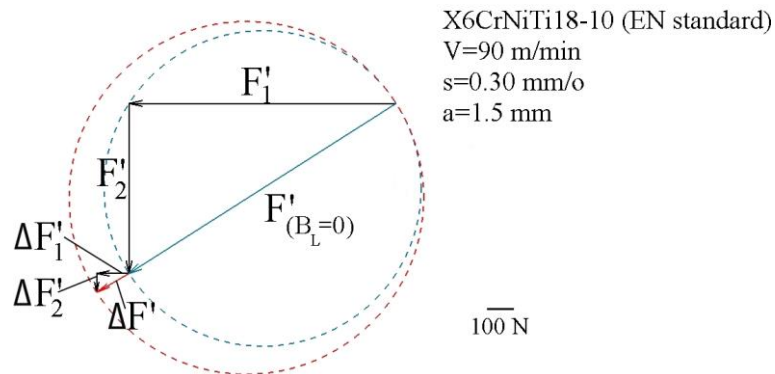


Slika 81. Odnosi komponenata sila-otpora rezanja pri ortogonalnom uzdužnom struganju č4732 sa konstantnom dubinom rezanja  $a = 1\text{ mm}$ .

Sile odnosno otpori rezanja nacrtani su u odgovarajućoj razmeri i moguće ih je proveriti na osnovu rezultata merenja otpora rezanja koji su sistematizovani u prilogu ovog rada. To znači da je eksperimentalno potvrđeno da su praktično porast sile rezanja usled postojanja širine leđnog pojasa habanja,  $\Delta F'$ , kolinearna sa silom rezanja kada je alat oštar  $F'_{(B_L=0)}$  odnosno da je ugao  $\zeta \approx 0^\circ$ .

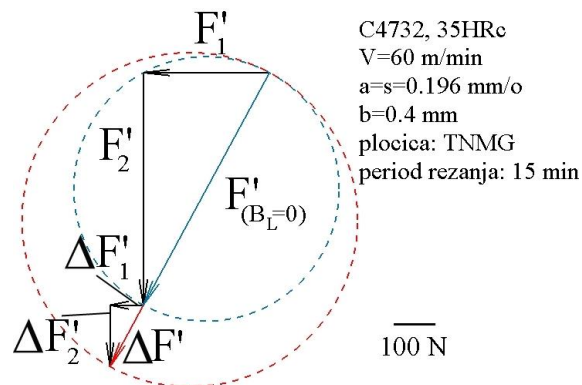
Pored prikazanih odnosa komponenata sila-otpora rezanja dobijenih na osnovu merenja u okviru ovog rada daje se i prikaz odnosa komponenata otpora rezanja pri

ortogonalnom rezanju na osnovu eksperimentalnih istraživanja u okviru [105] koji takođe potvrđuju pomenutu pretpostavku, slika 82.



Slika 82. Odnosi komponentata sila-otpora rezanja pri ortogonalnom struganju

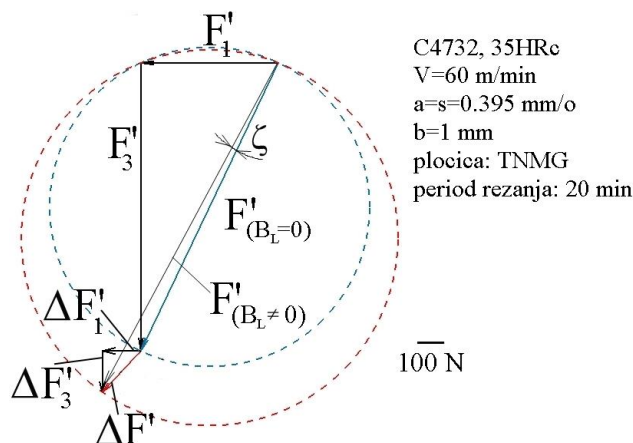
Ukoliko bi se analiziralo čisto ortogonalno rezanje (cevasti pripremak sa debljinom zida 0.4mm) dobijaju se odnosi komponentata otpora rezanja kao na slici 83.



Slika 83. Odnosi komponentata sila-otpora rezanja pri čistom ortogonalnom rezanju

Odnos između sila je, kao i u većini slučajeva, takav da je ugao  $\zeta = 0^\circ$ .

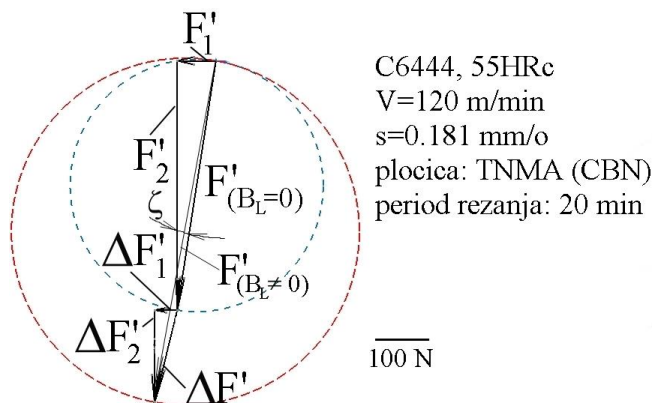
Ukoliko bi se posmatrao slučaj uzdužnog ortogonalnog rezanja (čeona prstenasta površina) dobijaju se odnosi komponentata otpora rezanja kao na slici 84. Rezultati merenja otpora dati su u prilogu ovog rada.



Slika 84. Odnosi komponenata sila-otpora rezanja pri ortogonalnom rezanju (čeona prstenasta površina)

Odnos komponenata sila-otpora je takav da postoji ugao  $\zeta$ . Eksperimentalno je pokazano da je vrednost ugla  $\zeta \approx -3^\circ$ .

Kada je u pitanju obrada komada velike tvrdoće 55-62HRc odnos između komponenata otpora rezanja je takav da je ugao  $\zeta \neq 0^\circ$ . Odnos između komponenti otpora rezanja svodi se na postavljeni model koji je prikazan na slici 62. Na slici 85 prikazan je odnos komponenata otpora rezanja pri obradi čelika č6444 tvrdoće 55HRc.

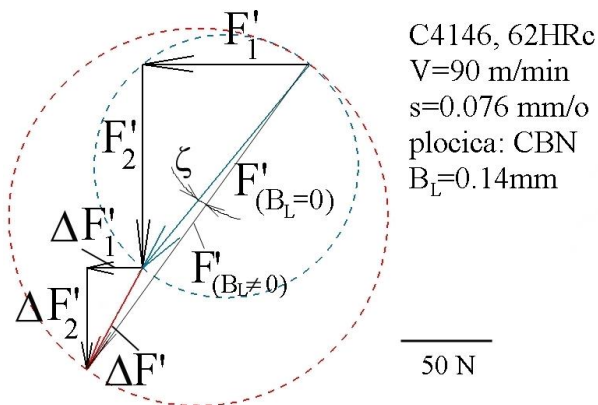


Slika 85. Odnosi komponenata sila-otpora rezanja pri ortogonalnom struganju č6444 sa konstantnom dubinom rezanja  $a = 0.15 \text{ mm}$

Može se zaključiti da usled velike tvrdoće komada dolazi do toga da je otpor prodiranja veći u odnosu na glavni otpor rezanja. Eksperimentalno je utvrđeno da se vrednost ugla  $\zeta$  oko  $-3^\circ$ .

Pored prikazanih odnosa komponenata sila-otpora rezanja dobijenih na osnovu merenja u ovom eksperimentu daje se i prikaz odnosa komponenata otpora rezanja pri ortogonalnom rezanju na osnovu eksperimentalnih istraživanja u okviru [25] koji takođe

potvrđuju da pored toga što se dobija sličan odnos sila-otpora dobija se i vrednost ugla  $\zeta$  koja pripada konstatovanom domenu , slika 86.



Slika 86. Odnosi komponenata sila-otpora rezanja pri ortogonalnom struganju č4146 sa konstantnom dubinom rezanja  $a = 0.12\text{mm}$

Eksperimentalnim putem potvrđen je odnos između komponenata otpora rezanja i njihovih priraštaja koji figurišu u uspostavljenom matematičkom modelu u ovom radu. Ova verifikacija je od izuzetne važnosti za treću fazu eksperimenta koja se odnosi na merenja koeficijenta trenja između leđne površine alata i obrađene površine.

## Određivanje parametara obradljivosti matematičkog modela promene širine leđnog pojasa habanja alata pri obradi Č4732

Polazi se od matematičkog modela koji je dat jednačinom 89. Neophodno je odrediti parametre obradljivosti  $p_1, q_1, y_1$  i konstantu  $K_1$  za odabrane uslove obrade:  $V, s, T$ .

Minimalna, maksimalna i srednje vrednosti faktora koji se menjaju definišu se na osnovu preporučenih vrednosti datih u tabeli 10.

Eksperimenti su izvođeni pri dubini  $a=1\text{mm}$  i dužini rezanja 350 mm, a rezultati merenja širine leđnog pojasa habanja prikazani su u tabeli 16.

Tabela 16. Plan eksperimenta sa kodiranim nivoima faktora. Obrada Č4732

Broj eksperimenta	Faktori-kodovi				Rezultati merenja		i- br.prolaza
	$K_1$	$t$	$v$	$s$	$B_L [mm]$	$y = \ln B_L$	
E1	1	+1	+1	+1	0.2	-1.609	24
E2	1	+1	+1	-1	0.08	-2.525	10
E3	1	+1	-1	+1	0.11	-2.207	12
E4	1	+1	-1	-1	0.09	-2.407	5
E5	1	-1	+1	+1	0.15	-1.897	14
E6	1	-1	+1	-1	0.09	-2.407	6
E7	1	-1	-1	+1	0.08	-2.525	7
n= E8	1	-1	-1	-1	0.05	-2.995	3
E9	1	0	0	0	0.18	-1.714	10
E10	1	0	0	0	0.17	-1.771	10
E11	1	0	0	0	0.18	-1.714	10
N=12	1	0	0	0	0.17	-1.771	10

Na osnovu akvizicije i statističke obrade eksperimentalnih podataka dobija se matematički model promene širine pojasa habanja na leđnoj površini alata:

$$B_L = K_1 \cdot V^{p_1} \cdot s^{q_1} \cdot t^{y_1} = 0.004 \cdot V^{0.37} \cdot s^{0.788} \cdot t^{0.69} \quad (110)$$



## Određivanje parametara obradljivosti matematičkog modela postojanosti alata u slučaju završne obrade čelika Č4732

Polazi se od matematičkog modela koji je dat jednačinom 90. Neophodno je odrediti parametre obradljivosti  $p_1, q_1, y_1$  i konstantu  $K_1$  za odabrane uslove obrade:  $V, s, B_L$ .

Minimalna, maksimalna i srednje vrednosti faktora koji se menjaju definišu se na osnovu preporučenih vrednosti datih u tabeli 10.

Eksperimenti su izvođeni pri dubini  $a=1\text{mm}$  i dužini rezanja 350 mm, a rezultati merenja postojanosti alata prikazani su u tabeli 17.

Tabela 17. Plan eksperimenta sa kodiranim nivoima faktora. Obrada Č4732

Broj eksperimenta	Faktori-kodovi				Rezultati merenja		
	$K_2$	$B_L$	$v$	$s$	$T[\text{min}]$	$y = \ln T$	
E1	1	+1	+1	+1	50	3.912	
E2	1	+1	+1	-1	20	2.995	
E3	1	+1	-1	+1	50	3.912	
E4	1	+1	-1	-1	20	2.995	
E5	1	-1	+1	+1	50	3.912	
E6	1	-1	+1	-1	20	2.995	
E7	1	-1	-1	+1	50	3.912	
n= E8	1	-1	-1	-1	20	2.995	
E9	1	0	0	0	35	3.555	
E10	1	0	0	0	35	3.555	
E11	1	0	0	0	35	3.555	
N=12	1	0	0	0	35	3.555	

Na osnovu akvizicije i statističke obrade eksperimentalnih podataka dobija se matematički model postojanosti alata:

$$T = K_2 \cdot V^{p_1} \cdot s^{q_1} \cdot B_L^{y_1} = 163,6 \cdot V^{-0.005} \cdot s^{1.313} \cdot B_L^{0.01} \quad (111)$$

**Određivanje parametara obradljivosti matematičkog modela promene porasta  
glavnog otpora rezanja pri obradi čelika Č4732**

Polazi se od matematičkog modela koji je dat jednačinama 91 i 93. Neophodno je odrediti parametre obradljivosti  $p_1, q_1, y_1$  i konstantu  $K_1$  za odabrane uslove obrade:  $V, s, t$ . Minimalna, maksimalna i srednje vrednosti faktora koji se menjaju definišu se na osnovu preporučenih vrednosti datih u tabeli 10.

Eksperimenti su izvođeni pri dubini  $a = 1\text{mm}$  i dužini rezanja 350 mm, a rezultati merenja postojanosti alata prikazani su u tabeli 18.

Tabela 18. Plan eksperimenta sa kodiranim nivoima faktora. Obrada Č4732

Broj eksperimenta	Faktori-kodovi				Rezultati merenja			
	$K_2$	$t$	$v$	$s$	$\Delta F_1 [N]$	$y = \ln \Delta F_1$	$F_{1UK} [N]$	$F_1 [N]$
E1	1	+1	+1	+1	150	5.010	640	490
E2	1	+1	+1	-1	410	6.016	680	270
E3	1	+1	-1	+1	150	5.010	650	500
E4	1	+1	-1	-1	45	3.806	365	320
E5	1	-1	+1	+1	170	5.135	700	530
E6	1	-1	+1	-1	70	4.248	350	280
E7	1	-1	-1	+1	150	5.010	430	320
n=E8	1	-1	-1	-1	30	3.401	330	300
E9	1	0	0	0	200	5.298	585	385
E10	1	0	0	0	150	5.010	570	420
E11	1	0	0	0	190	5.247	590	400
N=E12	1	0	0	0	190	5.247	590	400

Na osnovu akvizicije i statističke obrade eksperimentalnih podataka dobija se matematički model glavnog otpora rezanja:

$$F_{1UK} = K_2 \cdot V^{p_1} \cdot s^{q_1} \cdot t^{y_1} = 49.4 \cdot V^{0.312} \cdot s^{0.534} \cdot t^{0.431} \quad (112)$$

Na osnovu akvizicije i statističke obrade eksperimentalnih podataka dobija se matematički model porasta glavnog otpora rezanja:

$$\Delta F_1 = K_2 \cdot V^{p_1} \cdot s^{q_1} \cdot t^{y_1} = 0.362 \cdot V^{0.691} \cdot s^{1.092} \cdot t^{1.098} \quad (113)$$

## Određivanje parametara obradljivosti matematičkog modela promene porasta otpora prodiranja pri obradi čelika Č4732

Polazi se od matematičkog modela koji je dat jednačinama 92 i 94. Neophodno je odrediti parametre obradljivosti  $p_1, q_1, y_1$  i konstantu  $K_1$  za odabrane uslove obrade:  $V, s, t$ . Minimalna, maksimalna i srednje vrednosti faktora koji se menjaju definišu se na osnovu preporučenih vrednosti datih u tabeli 10.

Eksperimenti su izvođeni pri dubini  $a=1\text{mm}$  i dužini rezanja 350 mm, a rezultati merenja postojanosti alata prikazani su u tabeli 19.

Tabela 19. Plan eksperimenta sa kodiranim nivoima faktora. Obrada Č4732

Broj eksperimenta	Faktori-kodovi				Rezultati merenja			
	$K_2$	$t$	$v$	$s$	$\Delta F_2 [N]$	$y = \ln \Delta F_2$	$F_{2UK} [N]$	$F_2 [N]$
E1	1	+1	+1	+1	92	4.521	510	418
E2	1	+1	+1	-1	225	5.416	400	175
E3	1	+1	-1	+1	105	4.653	545	440
E4	1	+1	-1	-1	60	4.094	260	200
E5	1	-1	+1	+1	910	6.813	1370	460
E6	1	-1	+1	-1	60	4.094	240	180
E7	1	-1	-1	+1	110	4.700	520	410
n=E8	1	-1	-1	-1	20	2.995	210	190
E9	1	0	0	0	120	4.787	400	280
E10	1	0	0	0	155	5.043	435	280
E11	1	0	0	0	155	5.043	435	280
N=E12	1	0	0	0	155	5.043	435	280

Na osnovu akvizicije i statističke obrade eksperimentalnih podataka dobija se matematički model ukupnog otpora prodiranja:

$$F_{2UK} = K_2 \cdot V^{p_1} \cdot s^{q_1} \cdot t^{y_1} = 273.14 \cdot V^{0.519} \cdot s^{1.291} \cdot t^{-0.069} \quad (114)$$

Na osnovu akvizicije i statističke obrade eksperimentalnih podataka dobija se matematički model porasta ukupnog otpora prodiranja:

$$\Delta F_2 = K_2 \cdot V^{p_1} \cdot s^{q_1} \cdot t^{y_1} = 0.475 \cdot V^{0.05} \cdot s^{1.473} \cdot t^{1.616} \quad (115)$$

**Određivanje parametara obradljivosti matematičkog modela promene širine  
pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini alata pri obradi Č6444**

Polazi se od matematičkog modela koji je dat jednačinama 89. Neophodno je odrediti parametre obradljivosti  $p_1, q_1, y_1$  i konstantu  $K_1$  za odabrane uslove obrade:  $V, s, t$ . Minimalna, maksimalna i srednje vrednosti faktora koji se menjaju definišu se na osnovu preporučenih vrednosti datih u tabeli 11.

Eksperimenti su izvođeni pri dubini  $a = 0.15\text{mm}$  i dužini rezanja 350 mm, a rezultati merenja postojanosti alata prikazani su u tabeli 20.

Tabela 20. *Plan eksperimenta sa kodiranim nivoima faktora. Obrada Č6444*

Broj eksperimenta	Faktori-kodovi				Rezultati merenja	
	$K_1$	$t$	$v$	$s$	$B_{L(pl)}[mm]$	$y = \ln B_L$
C1	1	+1	+1	+1	0.47	-0.755
C2	1	+1	+1	-1	0.16	-1.832
C3	1	+1	-1	+1	0.35	-1.049
C4	1	+1	-1	-1	0.18	-1.714
C5	1	-1	+1	+1	0.24	-1.427
C6	1	-1	+1	-1	0.15	-1.897
C7	1	-1	-1	+1	0.2	-1.609
n= C8	1	-1	-1	-1	0.13	-2.040
C9	1	0	0	0	0.2	-1.609
C10	1	0	0	0	0.18	-1.714
C11	1	0	0	0	0.19	-1.660
N=C12	1	0	0	0	0.2	-1.609

Na osnovu akvizicije i statističke obrade eksperimentalnih podataka dobija se matematički model promene pojasa habanja na pomoćnoj leđnoj površini alata:

$$B_{L(pl)} = K_1 \cdot V^{p_1} \cdot s^{q_1} \cdot t^{y_1} = 0.071 \cdot V^{0.404} \cdot s^{0.402} \cdot t^{0.14} \quad (116)$$

#### 6.2.4. Merenje koeficijenta trenja između ledne površine alata i obrađene površine - treća faza eksperimenta

U toku procesa rezanja dolazi do pojave trenja između:

- Strugotine i grudne površine alata  $\mu$ ,
- Ledne površine alata i obrađene površine (odnosno pomoćne ledne površine alata i obrađene površine)  $\mu_1$ .

Matematički model koji je postavljen u okviru ove teze, poglavlje 5, praktično objedinjuje slučajeve idealno oštrog i zatupljenog alata uz mogućnost direktnog i efikasnog proračuna koeficijenta trenja  $\mu_1$  na osnovu već postojećeg modela sila rezanja pomoću koga se, na već poznat način, određuje koeficijent trenja  $\mu$ .

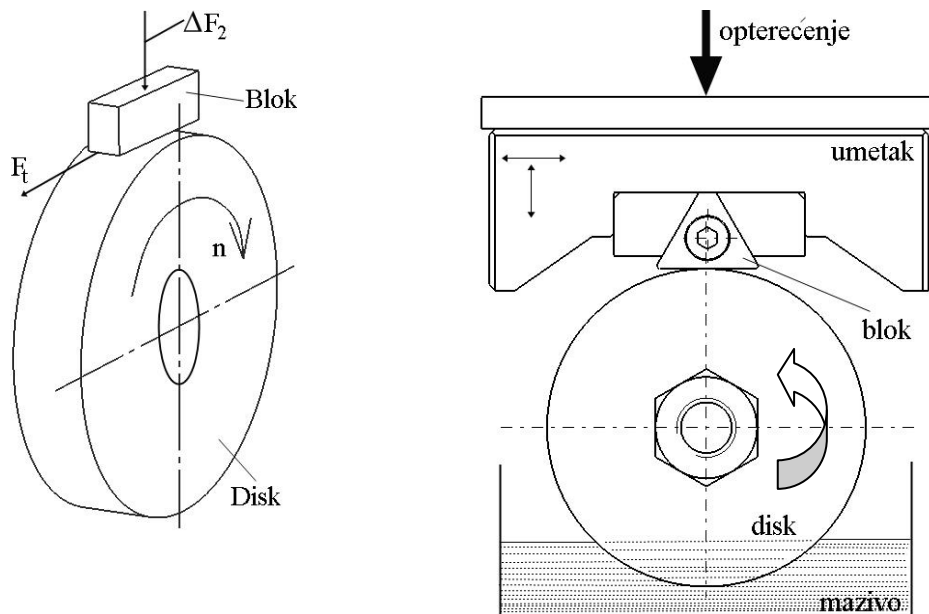
Za merenje koeficijenta trenja  $\mu_1$  koristio se tribometar blok na prstenu (disku) model TPD-95, prikazan na slici slika 87.



primena:	određivanje triboloških karakteristika u uslovima klizanja suvih ili podmazivanih površina
Moguće izlazne veličine:	koeficijent trenja, pređeni put, veličina habanja, temperatura maziva, kontaktna temperatura
Moguće dimenzije uzoraka:	epruveta: $\varnothing 10 \times 15 \text{ mm}$ blok: $6 \times 16 \times 12 \text{ mm}$ prsten: $\varnothing 45 - \varnothing 80 \times 10 \text{ mm}$ (otvor $\varnothing 10 \text{ H7 mm}$ )
Moguće vrste kontakta:	po liniji ili po površini
Mogući radni parametri:	normalna sila: do 450 N temperatura: sobna brzina klizanja: 0.1 – 5 m/s

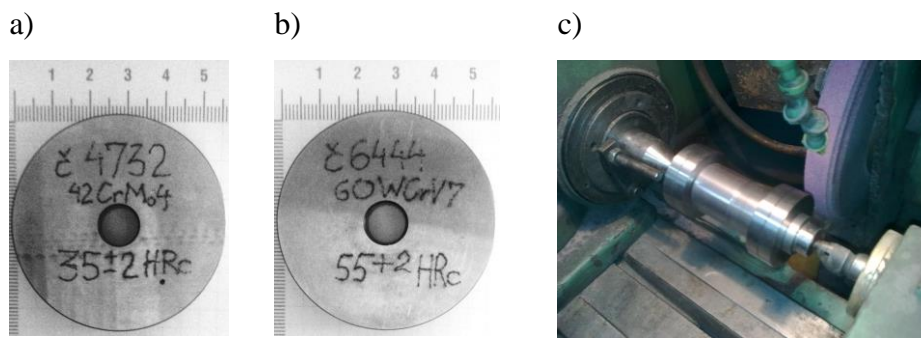
Slika 87. Tribometar TPD-95 sa tehničkim karakteristikama

Sušтина rada tribometra ogleda se u sledećem: blok, koji se pozicionira u odgovarajući umetak opterećuje se normalnom silom  $\Delta F_2$  koja se ne menja tokom eksperimenta. Blok je prislonjen na prsten-disk (po liniji ili površini), koji rotira konstantnim brojem obrtaja, a tribometar može da meri koeficijent trenja (veličinu habanja, kontaktnu temperaturu, temperaturu maziva), slika 88.



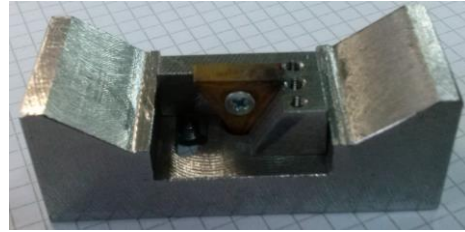
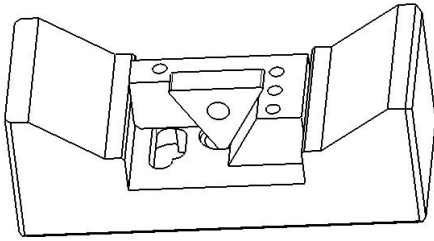
Slika 88. Šematski prikazi tribometra TPD-95

Gledano kroz prizmu ortogonalnog rezanja pri struganju blok bi bila pločica strugarskog noža, a disk je napravljen od identičnog materijala i iz iste šarže kao materijali obratka koji su opisani u opštim uslovima izvođenja eksperimenta. Diskovi su termički obrađeni na identičan način kao što je to učinjeno sa obratkom. Diskovi su zatim brušeni na brusilici za spoljašnje okruglo brušenje, slika 89.



Slika 89. Prikaz prstena-diska za tribometar: a)  $\phi 55 \times 10 \times 10H7$  - č4732; b)  $\phi 55 \times 10 \times 10H7$  - č6444; c) brušenje diskova nakon termičke obrade na brusilici za spoljašnje okruglo brušenje

Za potrebe merenja koeficijenta trenja na tribometru TPD-95 napravljen je poseban nosač za rezne pločice strugarskog noža, slika 90.



Slika 90. Napravljen nosač rezne pločice za tribometar TPD-95

### Merenje koeficijenta trenja između ledne površine alata i obrađene površine $\mu_1$

U okviru treće faze eksperimenta izvršena su četiri merenja koeficijenta trenja  $\mu_1$  koji su upoređeni sa vrednostima koje su dobijene matematičkim modelom kako bi se potvrdila njegova primenljivost. Izmeren je stacionarni koeficijent trenja  $\mu_1$ , nakon uhodavanja.

Izvršena su merenja sa sledećim parovima:

- Blok: rezna pločica TNMG i disk č4732, 35 HRc i
- Blok: rezna pločica TNMA i disk č6444, 55 HRc.

Uslovi pod kojima su izvršeni eksperimenti sa pomenutim parovima prikazani su u tabeli 21.

Tabela 21. Merenje koeficijenta trenja  $\mu_1$

	Blok	Disk	Broj obrtaja diska $n[\text{o/min}]$	$F_n \equiv \Delta F_2$ [N]	izmeren $\mu_1$	izračunat $\mu_1$
1.	Pločica TNMA	$\phi 55 \times 10 \times 10 H7$ Č6444	650	160	0.21	0,19
2.	Pločica TNMG	$\phi 55 \times 10 \times 10 H7$ Č4732	350	150	0.48	0.53

Napomena: merenje  $\mu_1$  izvršeno je bez maziva.

Odabrani režimi rada tribometra odgovaraju uslovima rezanja u drugoj fazi eksperimenta.

Merenje 1 - Odnosi komponentata rezanja prikazani na slici 85. Na osnovu jednačine (56) može se lako izračunati koeficijent trenja  $\mu$  :

$$\mu = \frac{F'_t}{F'_n} = \frac{F'_1 \sin \gamma + F'_2 \cos \gamma}{F'_1 \cos \gamma - F'_2 \sin \gamma} = \frac{67 \cdot \sin(-6) + 433 \cdot \cos(-6)}{67 \cdot \cos(-6) - 433 \sin(-6)} = 4.07 \quad (117)$$

Ugao trenja dobija se kao:

$$\rho = \arctan(\mu) = \arctan(4.07) \approx 76^\circ \quad (118)$$

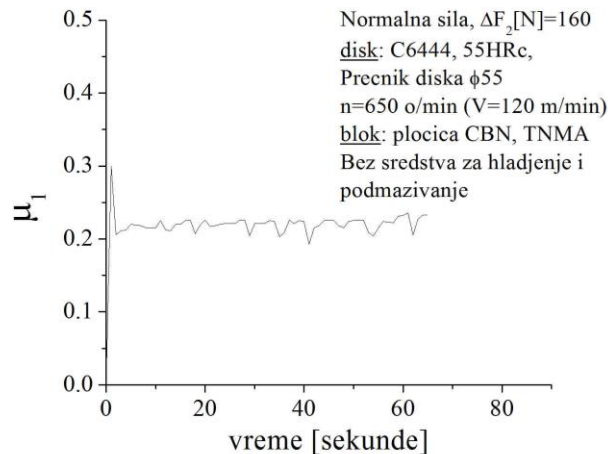
Na osnovu jednačine (63) može se odrediti ugao trenja:

$$\rho_1 = 90^\circ - \rho - \gamma - \zeta = 90^\circ - 76^\circ - 6^\circ + 3^\circ = 11^\circ \quad (119)$$

na osnovu jednačine (66) efikasno se može odrediti koeficijent trenja  $\mu_1$ :

$$\mu_1 = \operatorname{tg} \rho_1 = \operatorname{tg} 11^\circ = 0.19 \quad (120)$$

što se u velikoj meri podudara sa izmerenim koeficijentom trenja na tribometru čiji su rezultati merenja prikazani na slici 91.



Slika 91. Merenje koeficijenta trenja  $\mu_1$  pomoću tribometra

Na osnovu pomenutih merenja potvrđena je ispravnost postavljenog matematičkog modela.

Merenje 2 odnosi komponentata rezanja prikazani su u razmeri na slici 83. Na osnovu jednačine (56) može se lako izračunati koeficijent trenja  $\mu$ :

$$\mu = \frac{F'_t}{F'_n} = \frac{F'_1 \sin \gamma + F'_2 \cos \gamma}{F'_1 \cos \gamma - F'_2 \sin \gamma} = \frac{189 \cdot \sin(-6) + 350 \cdot \cos(-6)}{189 \cdot \cos(-6) - 350 \sin(-6)} = 1.52 \quad (121)$$

Ugao trenja dobija se kao:

$$\rho = \arctan(\mu) = \arctan(1.52) \approx 56^\circ \quad (122)$$

Na osnovu jednačine (63) može se odrediti ugao trenja:

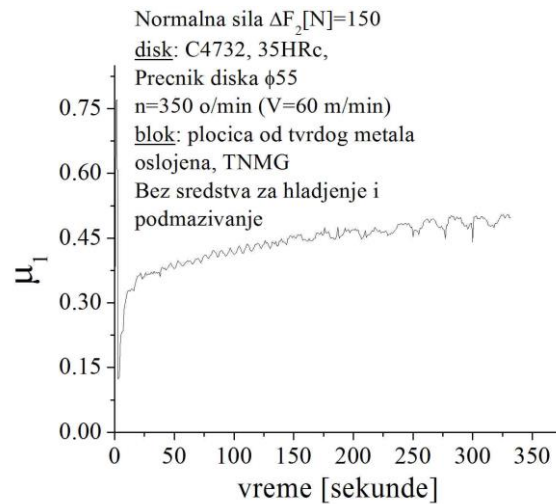


$$\rho_1 = 90^\circ - \rho - \gamma = 90^\circ - 56^\circ - 6^\circ = 28^\circ \quad (123)$$

na osnovu jednačine (66) efikasno se može odrediti koeficijent trenja  $\mu_1$  :

$$\mu_1 = \operatorname{tg} \rho_1 = \operatorname{tg} 28 = 0.53 \quad (124)$$

što se u velikoj meri podudara sa izmerenim koeficijentom trenja na tribometru čiji su rezultati merenja prikazani na slici 92.



Slika 92. Merenje koeficijenta trenja  $\mu_1$  pomoću tribometra

Kako bi se otklonila svaka sumnja u postavljeni matematički model, na osnovu rezultata merenja otpora rezanja, koji su prikazani u odgovarajućoj razmeri na slici 82, može se izračunati koeficijent trenja  $\mu$  na osnovu jednačine (56):

$$\mu = \frac{F'_t}{F'_n} = \frac{F'_1 \sin \gamma + F'_2 \cos \gamma}{F'_1 \cos \gamma - F'_2 \sin \gamma} = \frac{947 \cdot \sin(0) + 623 \cdot \cos(0)}{947 \cdot \cos(0) - 623 \sin(0)} = 0.63 \quad (125)$$

Ugao trenja dobija se kao:

$$\rho = \arctan(\mu) = \arctan(0.63) \approx 32^\circ \quad (126)$$

Na osnovu jednačine (63) može se odrediti ugao trenja:

$$\rho_1 = 90^\circ - \rho = 90^\circ - 32^\circ = 58^\circ \quad (127)$$

na osnovu jednačine (66) efikasno se može odrediti koeficijent trenja  $\mu_1$  :

$$\mu_1 = \operatorname{tg} \rho_1 = \operatorname{tg} 58 = 1.6 \quad (128)$$

Koeficijent trenja koji je izračunat na osnovu postavljenog matematičkog modela podudara se sa koeficijentom trenja koji je dobijen u [105] i iznosi  $\mu_1 = 1.57$ .

## 7. ZAKLJUČAK

---

Kroz istraživanja, predstavljena u ovoj disertaciji, razvijen je matematički model koji predviđa postojanost strugarskog noža u proizvodnim uslovima uzimajući u obzir korak, brzinu rezanja i širinu leđnog pojasa habanja. Takođe je izvršeno modeliranje sila u zoni rezanja koji pored sila za stvaranje strugotine uzima u obzir i dodatne sile koje se javljaju usled trenja između leđne površine alata i obrađene površine – upotpunjen Merçantov model sila. Oblast primene razvijenih modela odnosi se na zahvate klasičnog uzdužnog struganja (srednja tvrdoća obratka i srednje dubine rezanja) i struganja obratka visoke tvrdoće.

U okviru ovog poglavlja dat je osvrt na rezultate istraživanja, koji su predstavljeni u ovoj disertaciji, na način da su jasno razgraničeni rezultati koji su opisani u korišćenoj literaturi, od rezultata koji predstavljaju originalan doprinos ove disertacije. U nastavku su dati očekivani pravci daljih istraživanja kao i mogućnost praktične primene uspostavljenih matematičkih modela.

U okviru disertacije dat je pregled stanja istraživanja u oblasti modelovanja sila pri ortogonalnom rezanju uz konstataciju da je mali broj naučnih radova koji opisuju vezu između sila za formiranje strugotine i dodatnih sila rezanja koje nastaju kao posledica pojave pojasa habanja na leđnoj površini alata.

Na osnovu korišćenih literaturnih izvora izvršena je analiza i sistematizacija uticajnih faktora na brzinu, intenzitet i karakter procesa habanja i postojanost. Takođe je izvršeno rangiranje uticajnih parametara što je od posebnog značaja pri postavljanju matematičkog modela postojanosti.

Predstavljeni su matematički modeli koji definišu promenu širine leđnog pojasa habanja alata. Takođe je dat osvrt na dodatne sile koje se javljaju usled trenja između leđne površine alata i obrađene površine.

Predložen je potpuno nov matematički model sila u zoni rezanja koji pored sila za formiranje strugotine (koje su definisane Merçantovim modelom rezanja) obuhvata i poraste komponenata otpora rezanja usled trenja između leđne površine alata i obrađene površine. Matematički model sila u zoni rezanja objedinjuje dva stanja alata: idealno oštar alat sa pripadajućim silama i alat sa dozvoljenom širinom leđnog pojasa habanja

alata sa pripadajućim porastima komponenata otpora rezanja koji su posledica trenja između ledne površine alata i obrađene površine - upotpunjen Merčantov model sila pri ortogonalnom rezanju. Upotpunjen Merčantov model sila omogućava da se na efikasan način odredi koeficijent trenja između ledne površine alata i obrađene površine na osnovu koga se lako određuju pomenuti porasti komponenata otpora rezanja i time se omogućava tačnije predikovanje sile rezanja.

Akvizicijom i obradom eksperimentalnih podataka izvršena je verifikacija postavljenog matematičkog modela i određeni su parametri obradljivosti koji figurišu u proširenim izrazima koji predviđaju postojanost alata u proizvodnim uslovima.

Pri struganju čelika visoke tvrdoće č6444 (osikro 4) tvdroće 55 HRc, pod režimima rezanja koji se primenjuju u realnim proizvodnim uslovima, sa pločicom od kubnog bornitrida može se zaključiti sledeće:

- nakon 15 minuta rezanja dostignuta je maksimalna dozvoljena vrednost širine lednog pojasa habanja  $B_L = 0.2mm$
- ukupan glavni otpor rezanja  $F_{1UK}$  i ukupan otpor prodiranja  $F_{2UK}$  linearno se povećavaju sa porastom širine lednog pojasa habanja,
- Porast otpora prodiranja usled postojanja širine lednog pojasa habanja alata  $\Delta F_2$  je veći od porasta glavnog otpora rezanja usled postojanja širine lednog pojasa habanja alata  $\Delta F_1$  što znači da je ukupan otpor prodiranja osetljiviji na promenu širine lednog pojasa habanja i može se uzeti kao osnova za razvoj strategije za praćenje stanja alata,
- pri završnoj obradi sa malim dubinama rezanja (manjih od 0.15 mm) porasti otpora rezanja usled postojanja širine lednog pojasa habanja postaju dominantni u odnosu na otpore rezanja za stvaranje strugotine (slučaj kada je alat oštar),
- eksperimentalno je pokazano da je u slučaju završne obrade otpor rezanja kada je alat oštar praktično kolinearan sa porastom otpora rezanja usled postojanja širine lednog pojasa habanja alata,
- Predikovane i izmerene vrednosti koeficijenta trenja  $\mu_1$  za razmatrane režime rezanja se poklapaju. Uočeno je da na koeficijent trenja  $\mu_1$  ima uticaja brzina rezanja.

Pri struganju čelika č4732 tvrdoće 35 HRc, pod režimima rezanja koji se primenjuju u realnim proizvodnim uslovima, sa oslojenom pločicom od tvrdog metala može se zaključiti sledeće:

- nakon 50 minuta rezanja dostignuta je maksimalna dozvoljena vrednost širine leđnog pojasa habanja,
- ukupan glavni otpor rezanja  $F_{1UK}$  i ukupan otpor prodiranja  $F_{2UK}$  linearno se povećavaju sa porastom širine leđnog pojasa habanja,
- Ukupan glavni otpor rezanja je veći od ukupnog otpora prodiranja,
- Otpor prodiranja ima veći porast od glavnog otpora rezanja pri povraćanju širine leđnog pojasa habanja alata i može se uzeti kao osnova za razvoj strategije za praćenje stanja alata,
- Predikovane i izmerene vrednosti koeficijenta trenja  $\mu_1$  za razne režime rezanja se poklapaju.

Očekivani pravac daljih istraživanja, kada je u pitanju matematički model postojanosti alata, odnosio bi se na određivanje parametra obradljivosti za različite parove materijala alata i obratka. Kada je u pitanju predikovanje sila rezanja dalja istraživanja bi se odnosila na određivanje vrednosti ugla  $\zeta$  (ugao između  $F'(B_L = 0)$  i  $\Delta F'$ ) za različite parove materijala alata i obratka čime bi se proverila univerzalnost primene postavljenog upotpunjenog Merçantovog modela sila rezanja i tačnije predvideo koeficijent trenja  $\mu_1$ . Istraživanja sprovedena u okviru disertacije zbog svoje praktičnosti mogu se implementirati u postojeće simulacione softvera koji se tiču sila i temperatura u zoni rezanja i omogućilo bi se njihovo tačnije predviđanje.

## 8. LITERATURA

---

- [1] Seker, U., Kurt, A., Ciftci, I., *Design and construction of a dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion*, Materials and Design, 23: 355-360, (2002)
- [2] Ee, K., Li, P., Balaji, A., Jawahir, I., Stevenson, R., *Performance-based predictive models and optimization methods for turning operations and applications: part 1- tool wear/tool life in turning with coated grooves tools*, Journal of Manufacturing Processes, Vol.8.:54-66, (2006)
- [3] Choudhury, S, K., Appa Rao, I, V, K., *Optimization of cutting parameters for maximizing tool life*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39: 343-353, (1999)
- [4] Dimla, E, Snr., *Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40: 1073-1098, (2000)
- [5] Moshksar, M., Ebrahimi, A., *Evaluation of machinability in turning of microalloyed and quenched-tempered steels: tool wear, statistical analysis, chip morphology*, Journal of Materials processing Technology, 209: 910-921, (2009)
- [6] Wang, X., Da, Z., Balaji, A., Jawahir, I., Stevenson, R., *Performance-based predictive models and optimization methods for turning operations and applications: part 3-optimum cutting conditions and selection of cutting tools*, Journal of Manufacturing Processes, Vol.8.:61-74, (2007)
- [7] Chou, Y., Evans, C., *Tool wear mechanism in continuous cutting of hardened tool steels*, Wear, 212: 59-65, (1997)
- [8] [www.nptel.iitm.ac.in](http://www.nptel.iitm.ac.in), Lesson 3, *Geometry of single point cutting tools*, Kharapur,

- [9] [www.nptel.iitm.ac.in](http://www.nptel.iitm.ac.in), Lesson 4, *Conversion of tool angles from one system to another*, Kharapur,
- [10] [www.nptel.iitm.ac.in](http://www.nptel.iitm.ac.in), Lesson 5, *Mechanics of chip formation*, Kharapur,
- [11] [www.nptel.iitm.ac.in](http://www.nptel.iitm.ac.in), Lesson 6, *Orthogonal and oblique cutting*, Kharapur,
- [12] [www.nptel.iitm.ac.in](http://www.nptel.iitm.ac.in), Lesson 7, *Use of chip breaker in machining*, Kharapur,
- [13] [www.nptel.iitm.ac.in](http://www.nptel.iitm.ac.in), Lesson 8, *Machining forces and Merchant's circle diagram*, Kharapur,
- [14] [www.nptel.iitm.ac.in](http://www.nptel.iitm.ac.in), Lesson 9, *Analytical and experimental determination of cutting forces*, Kharapur,
- [15] Merchant, E., *Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and type 2 chip*, Journal of applied physics, Vol.16, No.5: 267-275, (1945)
- [16] Long, Y., *Modeling of the effect of tool wear on cutting forces in turning*, PhD thesis, Clemson University, (2008)
- [17] Markopoulos, A., P., *Finite element method in machining processes*, SpringerBriefs in manufacturing and surface engineering, (2012),
- [18] Kwon, Y., Fischer, W, G., *A novel approach to quantifying tool wear and tool life measurements for optimal tool management*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43: 359-368, (2003)
- [19] Byrne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I, Ketteler, G., Konig, W., Teti, R., *Tool condition monitoring (TCM) – the status of research and industrial application*, Keynote paper, Annals of the CIRP, Vol.44: 541-561, (1995)
- [20] Tanovic, Lj., *Razvoj metoda automatske identifikacije habanja alata*, Magistarska teza, Masinski fakultet univerziteta-Beograd, (1984)

- [21] Wang, J., Huang, C, Z., Song, W, G., *The effect of flank wear on the orthogonal cutting process and its practical implications*, Journal of Materials Processing Technology, 142: 338-346, (2003)
- [22] Lim, G., *Tool-wear monitoring in machine turning*, Journal of Materials Processing Technology, 51: 25-36, (1995)
- [23] Sikdar, S, K., Chen, M., *Relationship between tool flank wear area and component forces in single point turning*, Journal of Materials Processing Technology, 128:210-215, (2002)
- [24] Bonafacio, M., Diniz, A., *Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools*, Wear 173: 137-144, (1994)
- [25] Huang, Y., Liang, S., *Modeling of cutting forces under hard turning conditions considering tool wear effect*, Transaction of ASME, Vol. 127: 262-270, (2005)
- [26] Wang, W., Hong, G., Wong, Y., *Flank wear measurement by a treshold independent method with sub-pixel accuracy*, International Journal of Machine Tool and Manufacture, 46: 199-207, (2006)
- [27] Kopač, J., Šali, S., *Tool wear monitoring in turning process*, Journal of Materials Processing Technology, 113: 312-316, (2001)
- [28] Vencl, A., *Istraživanje mogućnosti poboljšanja triboloških karakteristika Al-Si legura u uslovima klizanja*, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, (2008)
- [29] Kalajdžić, M., *Tehnologija masinogradnje*, Masinski fakultet Beograd, (2008)
- [30] Chang, T., Wysk, R., Wang, H., *Computer aided manufacturing*, Prentice Hall, (2006)
- [31] Kahalili, K., Safaei, M., *FEM analysis of edge preparation for chamfered tools*, Int. J. Mater Form, 2: 217-224, (2009)

- [32] ISO 3685, *Tool life testing with single-point turning tools*, International standard, (1993)
- [33] Ee, K., Balaji, A., Li, P., Jawahir, I., Force decomposition model for tool-wear in turning with grooved cutting tools, *Wear*, 249: 958-994, (2002)
- [34] Lim, C., Lau, P., Lim, S., The effects of work material on tool wear, *Wear* 250: 344-348, (2001)
- [35] Yen, Y-C., Sohner, J., Lilly, B., Altan, T., *Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis*, *Journal of Materials Processing Technology*, 146: 82-91, (2004)
- [36] Yen, Y, C., Jain, A., Altan, T., *A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries*, *Journal of Materials Processing Technology*, 146: 72-81, (2004)
- [37] Yaldiz, S., Unsacar, F., *A dynamometer design for a measurement the cutting forces on turning*, *Measurement*, 39: 80-90, (2006)
- [38] Xinfeng, He., Su, Wu., Kratz, H., Forces in hard turning of 51CrV4 with wiper cutting tool, *Tsinghua science and technology ISSN*, Vol.11 : 501-506, (2006)
- [39] Kahalili, K., Safaei, M., *FEM analysis of edge preparation for chamfered tools*, *Int. J. Mater Form*, 2: 217-224, (2009)
- [40] Strafford, K, N., Audy, J., *Indirect monitoring of machinability in carbon steels by measurement of cutting forces*, *Journal of Materials Processing Tehnology*, 67: 150-156, (1997)
- [41] Shinozuka, J., Obikawa, T., Shirakashi, T., *Chip breaking analysis from the viewpoint of the optimum cutting tool geometry design*, *Journal of Materials Processing Technology*, 62: 345-351, (1996)
- [42] Szecsi, T., *Automatiic cutting-tool condition monitoring on CNC lathes*, *Journal of Materials Processing Technology*, 77: 64-69, (1998)



- [43] Stepanov, A.,A., *Simulating the design of special cutting tools*, Russian Engineering Research, Vol. 28, No2: 25-28, (2008)
- [44] Seah, K., Li, X., Lee, K., *The effect of applying coolant on tool wear in metal machining*, Journal of Materials Processing Technology, 48: 495-501, (1995)
- [45] Scheffer, C., Kratz, H., Heys, P, S., Klocke, F., *Development of a tool flank wear-monitoring system for hard turning*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43: 973-985, (2003)
- [46] Qian, Li., Hossan, M., *Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts*, Journal of Materials Processing Technology, 191: 274-278, (2007)
- [47] Tanovic, Lj, Petrakov, Ju., *Teorija i simulacija procesa obrade*, Masinski fakultet Beograd, (2007)
- [48] Salgam, H., Yaldiz, S., Unsacar, F., *The effect of tool geometry and cutting speed on main cutting force and tool tip temperature*, Materials and design, Vol.28: 101-111, (2007)
- [49] Kuang-Fua, F., Chung-Shin, C., *A force model for a single-point tools with a chamfered main cutting edge*, Journal of Materials Processing Technology, Vol.42: 319-340, (1994)
- [50] Kovačević, S., *Prilog rešavanju problema uticaja habanja alata na postojanost alata*, Mašinstvo, br.2, (1980)
- [51] Klimenko, S, A., Manokhin, A, S., Mel'niichuk, A, Yu., *Wear and life tool with inserts form cBN-Based polycrystalline superhard materials in the finish turning of hardened steels at heavy feeds*, Journal of superhard materials, Vol.34, No1: 49-55, (2012)
- [52] Klimenko, S, A., *Obrabotka rezaniem detalei s pokritijami*, Monografija, Kiev, (2011)

- [53] Klocke, F., Kratz, H., *Advanced tool edge for high precision hard turning*, Laboratory for machine tools and production engineering-Aachen university,( \_ )
- [54] Kadirgama, K., Abou-El-Hosein, K., Noor, M., Sharma, K., Mohammad, B., *Tool life and wear mechanism when machining Hastelloy C-22HS*, *Wear*, 270: 258-268, (2011)
- [55] Jianwen, Hu., Chou, K., *Characterisations of cutting tool flank wear-land contact*, *Wear* 263: 1454-1458, (2007)
- [56] Armarego, E, J, A., Herath, A, B., *Predictive models for machining with multi-edge form tools based on a generalised cutting approach*, *Annals of the CIRP*, Vol. 49: 25-30, (2000)
- [57] Waldorf, D., *A simplified model for ploughing forces in turning*, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 8/No. 2: 76-82, (2006)
- [58] Waldorf, D, J., DeVor, R, E., Kapoor, S, G., *An evaluation of ploughing models for orthogonal machining*, *Transaction of ASME*, Vol. 121, (1999)
- [59] Vucicevic, M., *Istrazivanje procesa završne obrade struganjem teskoobradivih sinterovanih materijala*, Doktorska disertacija, Masinski fakultet, Beograd (1994)
- [60] Totis, G., Sortino, M., *Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51: 34-42, (2011)
- [61] Tasan, Y, C., Rooij, M, B., Schipper, D, J., *Measurement of wear on asperity level using image-processing techniques*, *Wear*, 258: 83-91, Elsevier, (2005)
- [62] Tay, H., Skidar, S., Mannan, M., *Topography of the flank wear surface*, *Journal of Materials Processing Technology*, 120: 243-248, (2002)
- [63] Attanasio, A., Ceretti, E., Rizzuti, S., Umbrello, D., Micari, F., *3D finite element analysis of tool wear in machining*, *CIRP Annals-Manufacturing technology*, 57: 61-64, (2008)

- [64] Barlier, C., Lescalier, C., Mosian, A., *Continuous flank wear measurement of turning tools by integrated microthermocouple*, Annals of the CIRP, Vol. 46: 35-38, (1997)
- [65] Bryant, M., *Physics of machining*, University of Texas at Austin, (2006),
- [66] Armarego, E., Katta, R., *Predictive cutting model for forces and power in self-propelled rotary tool turning operations*, Annals of the CIRP, Vol. 46: 19-24, (1997)
- [67] Choi, D., Kwon, T. W., Chu, C. N., *Real time monitoring of tool fracture in turning using sensor fusion*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 15: 305-310, (1999)
- [68] Chou, K., Song, H., *Tool nose radius effect on finish hard turning*, Journal of Materials Processing Technology, 148: 259-268, (2004)
- [69] Isik, Y., *Investigating the machinability of tool steels in turning operations*, Materials and design, 28: 1417-1424, (2007)
- [70] Islam, S., Ibrahim, R., *Mechanism of abrasive wear in nanomachining*, Tribol Lett, 42:275-284, (2011)
- [71] Huang, Y., Dawson, Ty., *Tool crater wear depth modeling in CBN hard turning*, Wear 258: 1455-1461, (2005)
- [72] Hakim, M., Abad, M., Abdelhameed, M., Shalaby, M., Veldhuis, S., *Wear behavior of some cutting tool materials in hard turning of HSS*, Tribology international, 44: 1174-1181, (2011)
- [73] Globocki, G., *Some results of tribological properties measurements of group heavy machining materials on tribometer "block on disk"*, 8th International tribology conference Belgrade, 394-399, (2003)
- [74] Gencoglu, A., *Physics based turning process simulation*, PhD thesis, University of British Columbia, (2011)

- [75] Choudhury, S., Kumar, E., Ghosh, A., *A scheme of adaptive turning operations*, Journal of Materials processing Technology, 87: 119-127, (1999)
- [76] Choudhury, S., Srinivas, P., *Tool wear prediction in turning*, Journal of Materials Processing Technology, 153-154: 276-280, (2004)
- [77] Choudhury, I., El-Baradie, M., *Tool-life prediction model by design of experiments for turning high strength steel (290 BHN)*, Journal of Materials processing Technology, 77: 319-326, (1998)
- [78] Choudhury, I., A., See, N., L., Zuhairi, M., *Machining with chamfered tools*, Journal of materials processing technology, 170: 115-120, (2005)
- [79] Costes, J., Guillet, Y., Poulachon, G., Dessoly, M., *Tool-life and wear mechanism of CBN tools in machining of Inconel 718*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47: 1081-1087, (2007)
- [80] Clancy, B., Shin, Y., *A comprehensive chatter prediction model for face turning operation including tool wear effect*, International Journal of Machine tools and Manufacture, 42: 1035-1044, (2002)
- [81] Luo, X., Cheng, K., Holt, R., Liu, X., *Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting*, Wear, 259: 1235-1240, (2005)
- [82] Matsumura, T., Shirakasi, T., Usui, E., *Identification on wear characteristics in tool wear model of cutting process*, Springer/ESAFORM: 555-558, (2008)
- [83] Marković, S., Lazović, T., Marinković, A., Tanasijević, S., Josifović, D., *Tehnološko nasleđe površina tribo-mehaničkih sistema regenerisanih navarivanjem*, 12<sup>th</sup> International Conference on Tribology, Kragujevac-Serbia, 431-440, (2011)
- [84] McKerrow, P., *Introduction to robotics*, Addison Wesley, (1991)

- [85] Mehrban, M., Naderi, D., Panahizadeh, V., Moslemi Naeini, H., *Modeling of tool life in turning process using experimental method*, Springer/ESAFORM: 559-562, (2008)
- [86] Milutinovic, M., Tanovic, Lj., *Uticaj habanja ledne površine alata na postojanost*, 34th International conference on production engineering-Nis, proceedings, 33-36, (2011)
- [87] Molinari, A., Moufki, A., *The Merchant's model of orthogonal cutting revisited: A new insight into the modeling of chip formation*, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 50: 124-131, (2008)
- [88] Santochi, M., Dini, G., Tantussi, G., Beghini, M., *A sensor-integrated tool for cutting force monitoring*, Annals of the CIRP, Vol.46: 49-52, (1997)
- [89] Umbrello, D., Ambrogio, G., Guerriero, F., Guido, R., *A clustering approach for determining the optimal process*, DOI 10.1007/s10845-009-0254-1, March (2009)
- [90] Vukasojevic, R., *Provjera pouzdanosti temperaturske metode za određivanje obradljivosti u IAMA*, Magistarski rad, Beograd, (1974)
- [91] Tanovic, Lj., Bojanic, P., Puzovic, R., Milutinovic, M., *Experimental Investigation of Microcutting Mechanisms in Granite Grinding*, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 133/2, 2011
- [92] Wong, T., Kim, W., Kwon, P., *Experimental support for a model-based prediction of tool wear*, Wear, 257: 790-798, (2004)
- [93] [www.nptel.iitm.ac.in](http://www.nptel.iitm.ac.in), Lesson 10, *Dynamometers for measuring cutting forces*, Kharapur,
- [94] [www.nptel.iitm.ac.in](http://www.nptel.iitm.ac.in), Lesson 12, *Control of cutting temperature and cutting fluid application*, Kharapur,

- [95] Oraby, S. E., Hayhurst, D. R., *Tool life determination based on the measurement of wear and tool force ratio variation*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44: 1261-1269, (2004)
- [96] Park, Y., Kim, T-Y., Woo, J., Shin, D., Kim, J., *Sliding mode cutting force regulation for turning processes*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 38: 911-930, (1998)
- [97] Pauliny, D., Javorek, Lj., *Effects of tool geometry-force ratio during tangential turning*, Ann. WULS-SGGW, Forestry and wood technology, No 75: 185-189, (2011)
- [98] Petropoulos, G., Ntziantzias, I., Anghel, C., *A predictive model of cutting force in turning using taguchi and response surface techniques*, 1<sup>th</sup> International conference on experiments/process/systems/modelling/simulation/optimization, Athens, (2005)
- [99] Petropulos, G., Ntziantzias, I., Anghel, C., *A predictive model of cutting force in turning using taguchi and response surface techniques*, 1st International conference on experiments/process/system modeling/simulation/optimization, Athens, (2005)
- [100] Poduraev, V., *Obrabotka rezaniem s vibracijami*, Masinostroenie, Moskva, (1970)
- [101] Zhao, H., Barber, G., Zou, Q., *A study of flank wear in orthogonal cutting with internal cooling*, Wear, 253: 957-962, (2002)
- [102] Novoselov, Yu, A., *Universal kinematic model of cutting processes*, Russian Engineering Research, Vol. 28: 579-583, (2008)
- [103] Remadna, M., Rigal, J., *Evolution during time of tool wear and cutting forces in the case of hard turning with CBN inserts*, Journal of Materials Processing Technology, 178: 67-75, (2006)
- [104] Laaksonen, J., *Visual measurement and modelling of tool wear in rough turning*, Master thesis, Lappeenranta university of technology, (2008)

[105] Lipatov, A., Chigirinskii, Yu., Kormilitsyn, S., *Determining the cutting forces and the rear tool surface*, STIN, No 8: 6-8, (2010)

## **PRILOG**



U okviru ovog priloga tabelarno su prikazane vrednosti otpora rezanja za različite režime rezanja i to za slučaj da je alat oštar i pohaban, tabela p1.

Tabela p1. Izmerene vrednosti otpora rezanja pri uzdužnom struganju

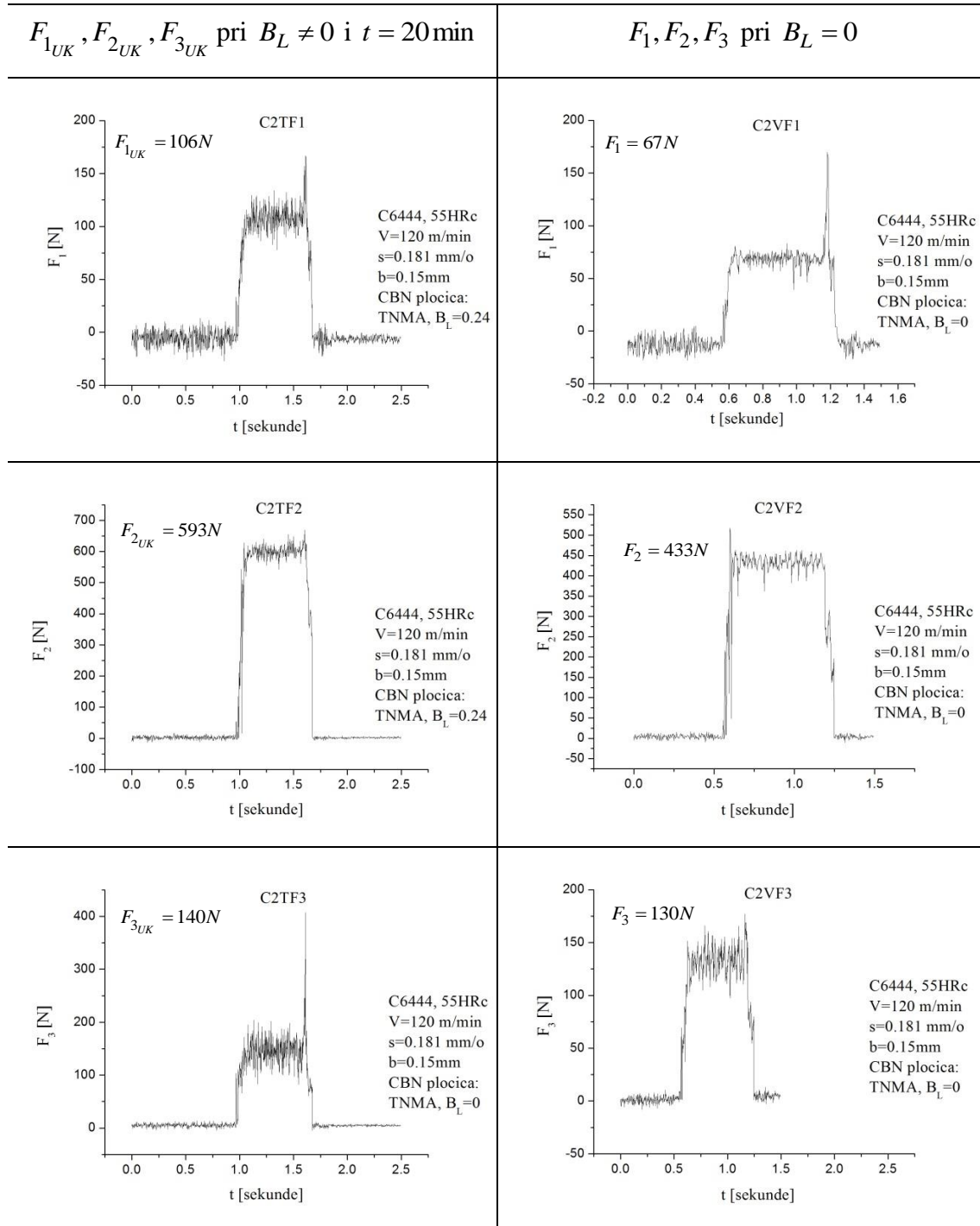


Tabela p1. Izmerene vrednosti otpora rezanja pri uzdužnom struganju, nastavak 1

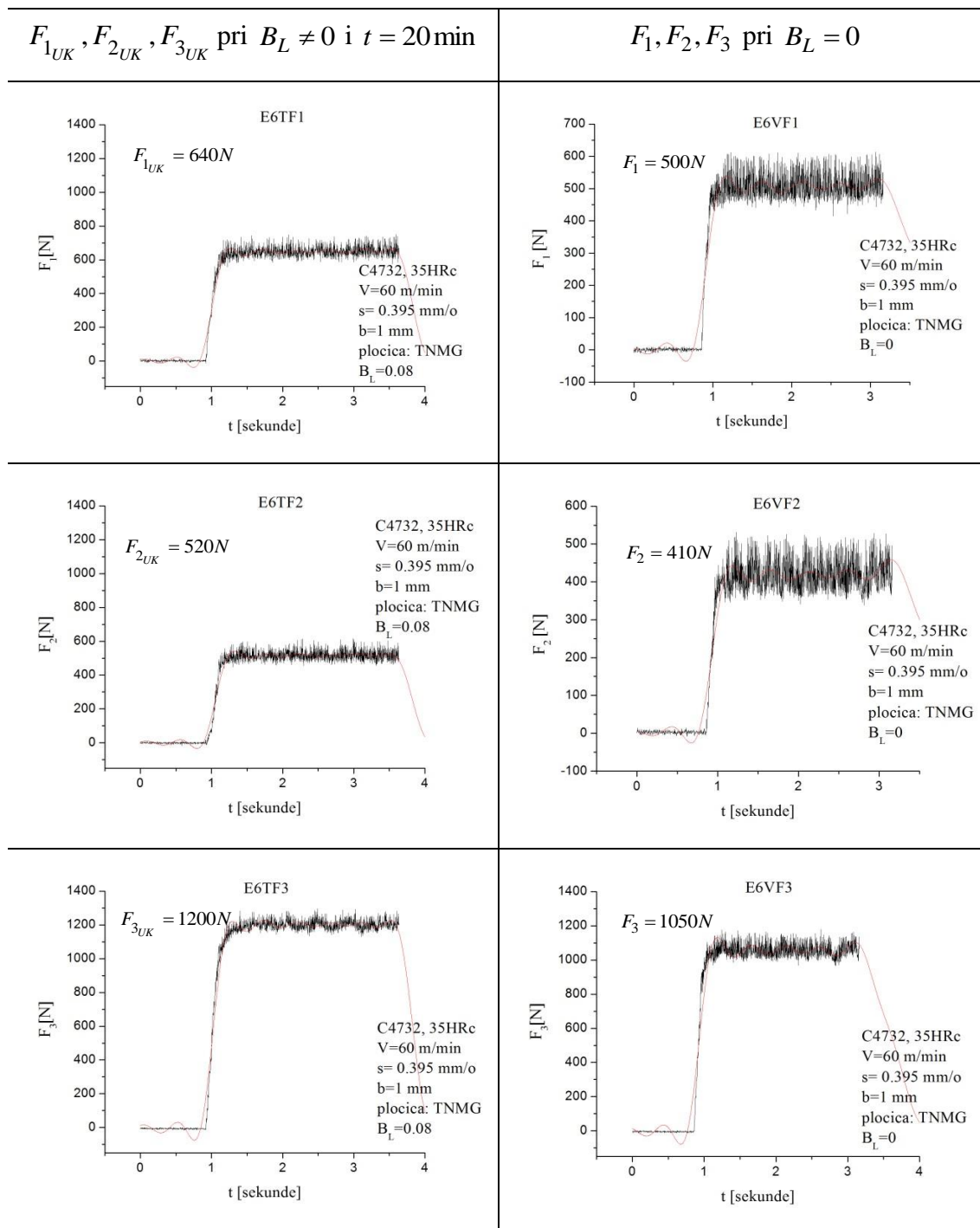


Tabela p1. Izmerene vrednosti otpora rezanja pri uzdužnom struganju, nastavak 2

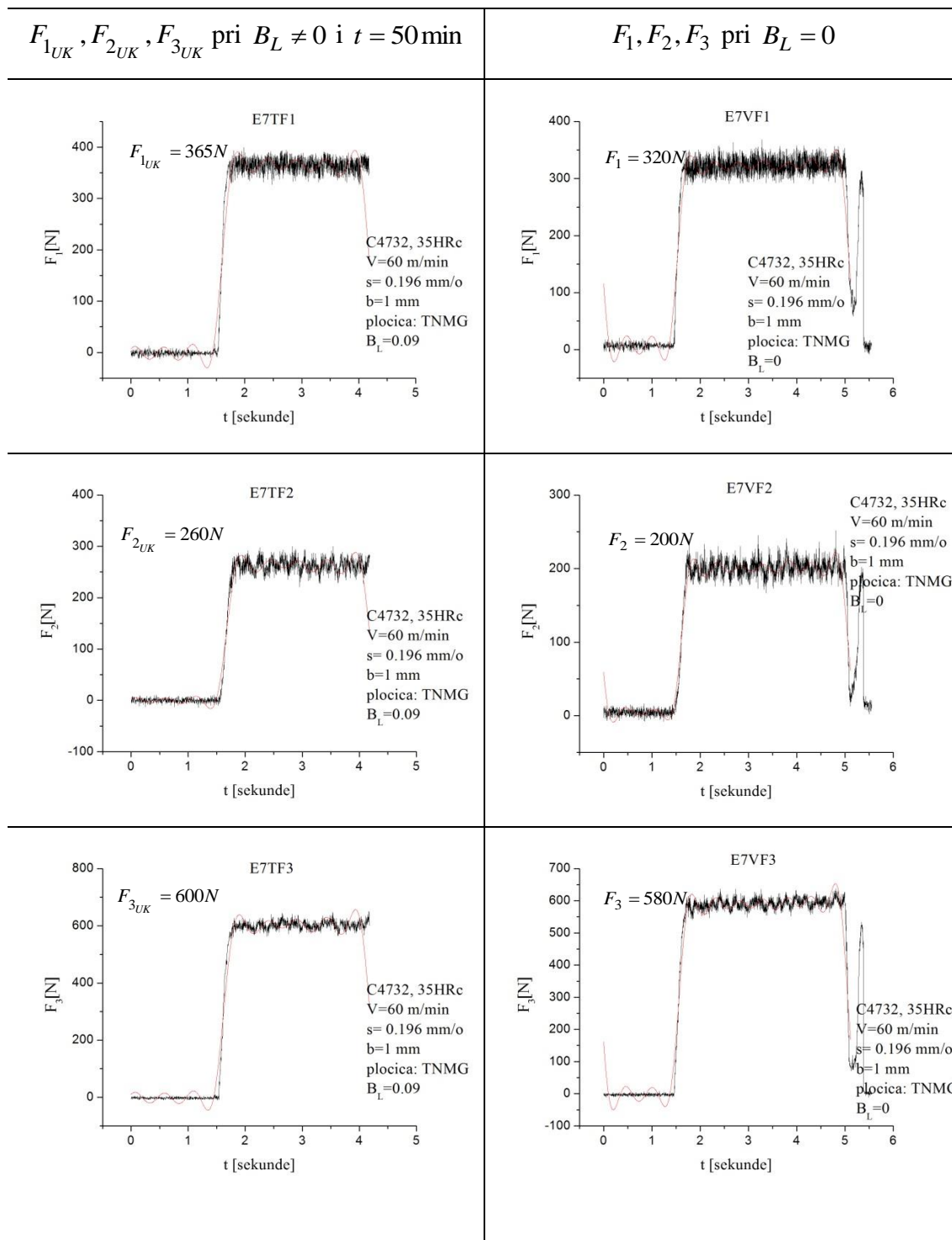


Tabela p1. Izmerene vrednosti otpora rezanja pri uzdužnom struganju, nastavak 3

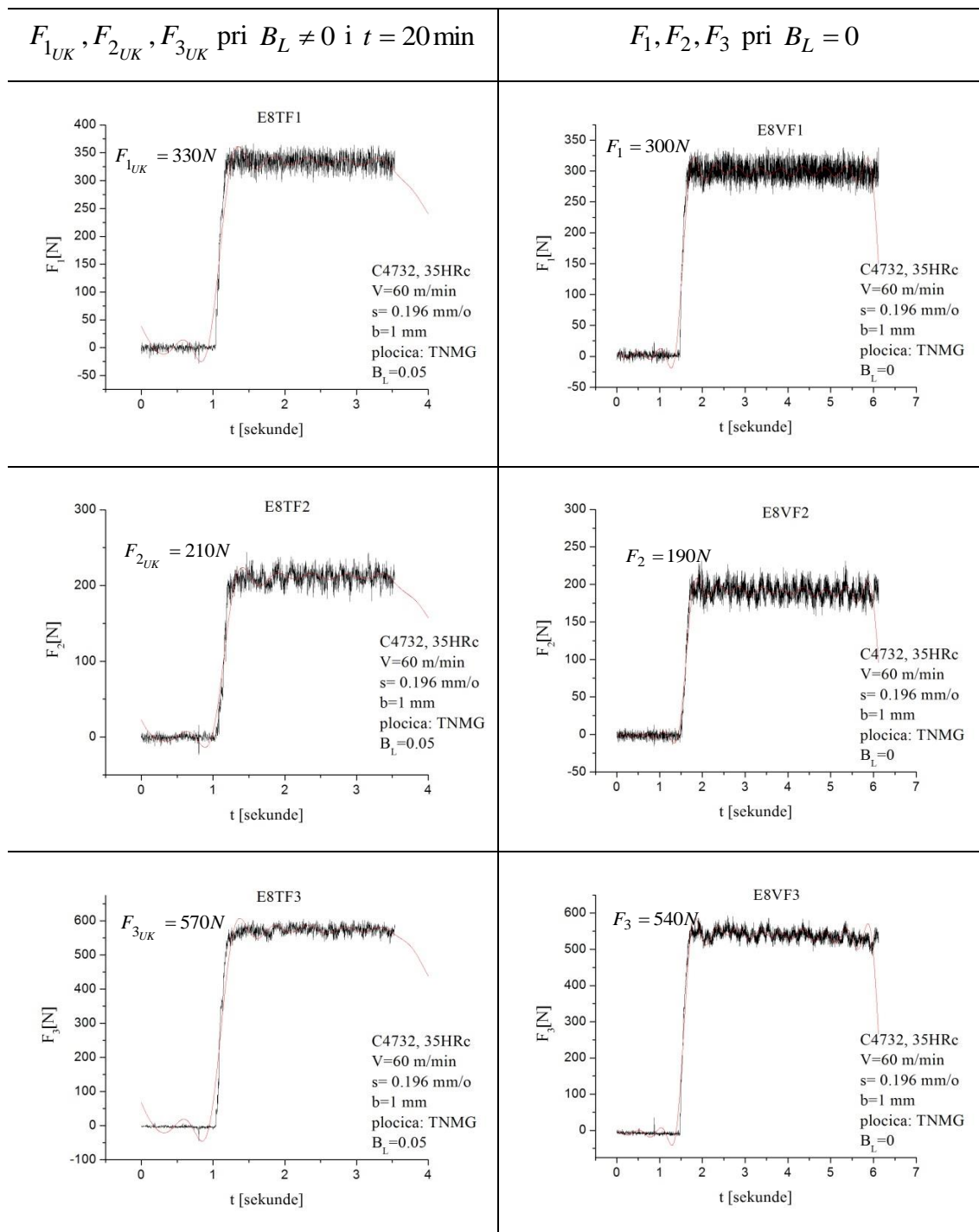


Tabela p1. Izmerene vrednosti otpora rezanja pri uzdužnom struganju, nastavak 4

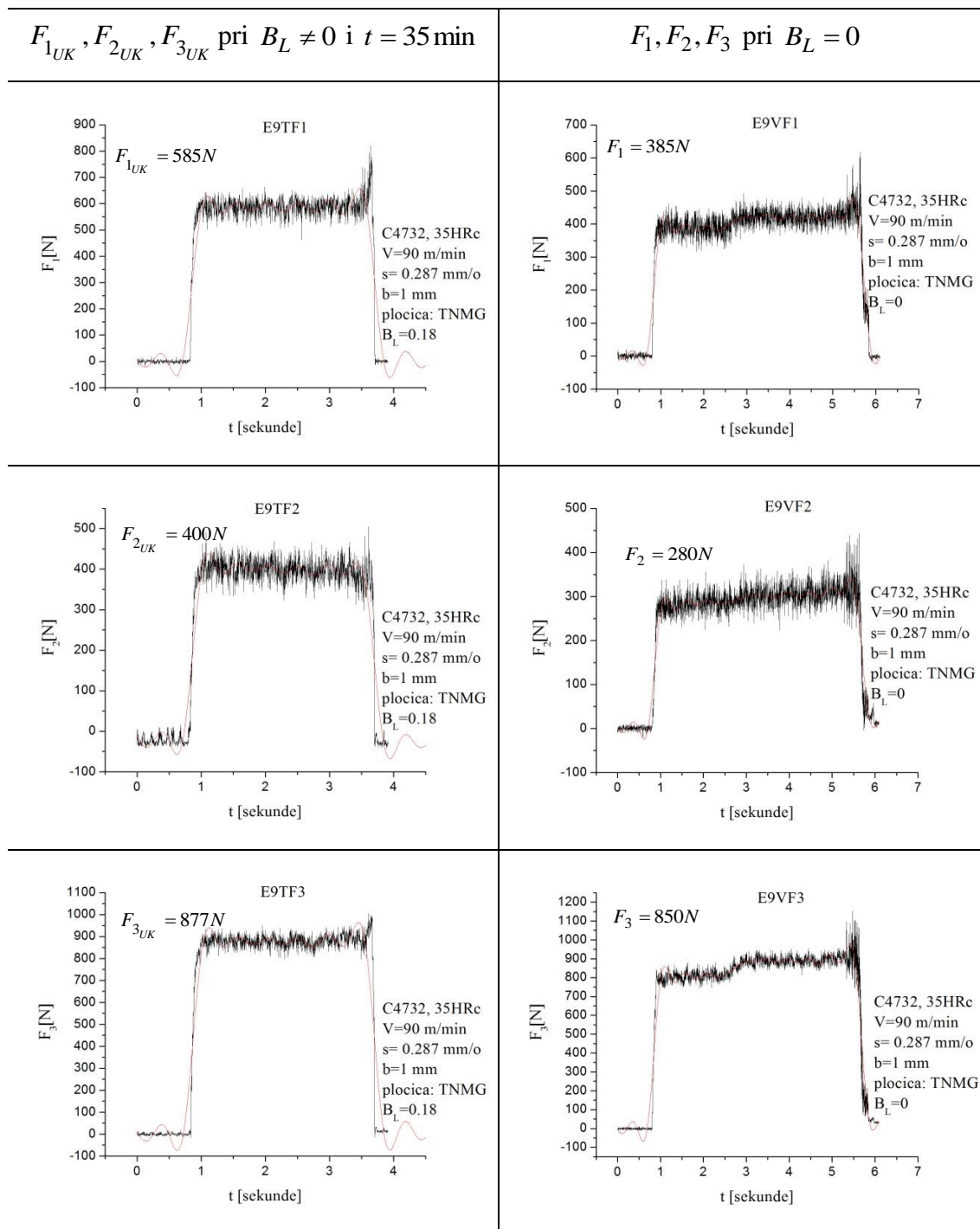
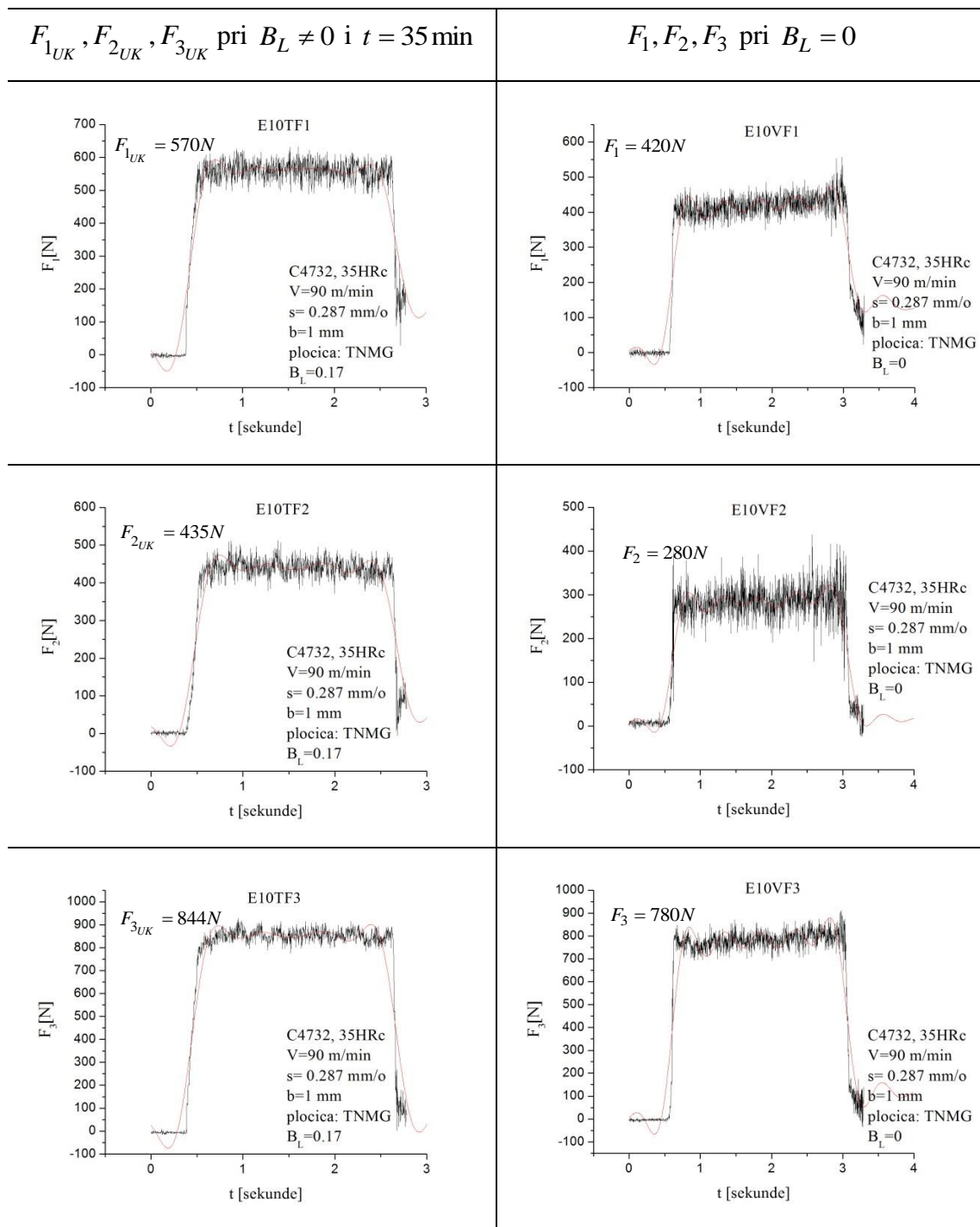


Tabela p1. Izmerene vrednosti otpora rezanja pri uzdužnom struganju, nastavak 5

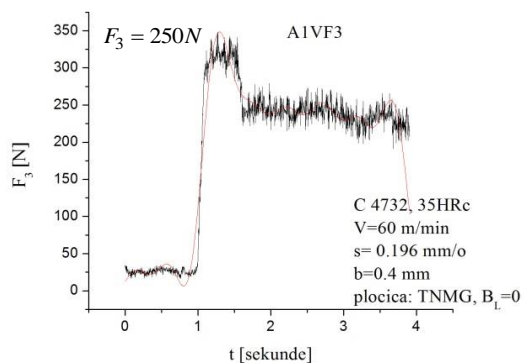
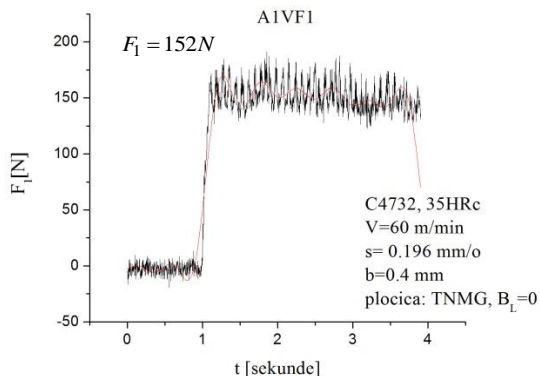


U tabeli 2p prikazane su izmerene vrednosti otpora rezanja pri struganju cevastog pripremk sa debljinama zida cevo 0.4mm, 0.6mm i 1 mm. Slučaj čistog ortogonalnog rezanja.

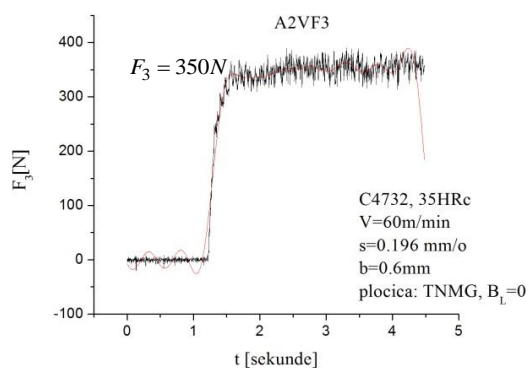
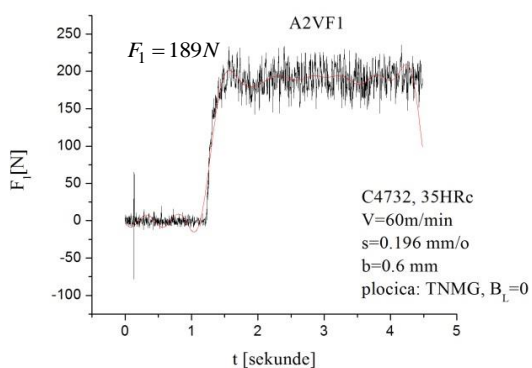
Tabela 2p. Izmerene vrednosti otpora rezanja pri struganju cevastog pripremk

$$F_1, F_3 \text{ pri } B_L = 0$$

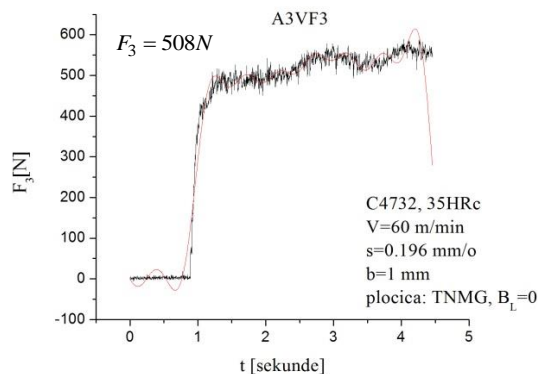
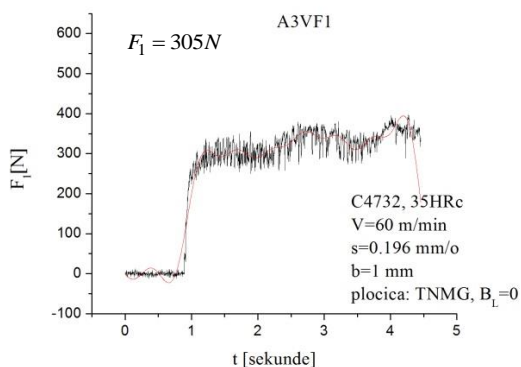
1. Debljina zida cevastog pripremk 0.4 mm



2. Debljina zida cevastog pripremk 0.6 mm



3. Debljina zida cevastog pripremk 1 mm



## **BIOGRAFIJA**

Ime i prezime: Milan Milutinović

Datum rođenja: 23.12.1979.

Mesto rođenja: Beograd, Srbija

Porodično stanje: Oženjen, jedno dete

### **Školovanje:**

1994/95 - 1998 Šesta beogradska gimnazija (prirodno-matematički smer),

1998/99 - 2004 Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu (pet godina-deset semestara). Smer: Proizvodno mašinstvo. Prosečna ocena u toku studija 9.03

Tema diplomskog rada: Mašina alatka sa paralelnom kinematikom tipa TRICEPT.

2004/05-2008 Poslediplomske studije (u trajanju od tri godine) na Mašinskom fakultetu u Beogradu.

Tema magistarske teze: Metodologija projektovanja prizmatičnih profilnih noževa

### **Stipendije:**

2004/05-2008 Stipendista Ministarstva za Nauku Republike Srbije.

### **Nagrade:**

Povodom Dana Mašinskog Fakulteta Univerziteta u Beogradu nagrađen kao najbolji student na petoj godini studija sa prosečnom ocenom 10 (deset).

Povodom Dana Mašinskog Fakulteta Univerziteta u Beogradu nagrađen za inzvanredan uspeh postignut u toku studija sa prosečnom ocenom 9.03 i ocenom 10 (deset) na diplomskom radu.



**Radno  
iskustvo:**

- 2005-2008 Kao stipendista Ministarstva Nauke republike Srbije angažovan na dva projekta tehnološkog razvoja,
- 2005-2008 Konstruktor alata i tehnolog u privatnoj firmi Gavro i sinovi doo (part-time),
- 2008-2010 Konstruktor alata i tehnolog u privatnoj firmi Gavro i sinovi doo (full-time).
- 2010-... Predavač u oblasti proizvodnih tehnologija na visokoj inženjerskoj školi strukovnih studija-Tehnikum Taurunum, Zemun.

## **Prilog 1.**

### **Izjava o autorstvu**

Potpisani mr Milan Milutinović

broj indeksa \_\_\_\_\_

### **Izjavljujem**

da je doktorska disertacija pod naslovom

#### **Istraživanje postojanosti strugarskog noža u proizvodnim uslovima pri ortogonalnom rezanju**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova,
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio autorska prava i korisio intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, 02.10.2015. godine

**Potpis doktoranda**



## Prilog 2.

### Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora: mr Milan Milutinović

Broj indeksa:

Studijski program:

Naslov rada: **Istraživanje postojanosti strugarskog noža u proizvodnim uslovima pri ortogonalnom rezanju**

Mentor: Prof. dr Ljubodrag Tanović, Mašinski fakultet u Beogradu

Potpisani Milan D. Milutinović

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje na portalu **Digitalnog repozitorijuma Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 02.10.2015. godine

**Potpis doktoranda**



**Prilog 3.**

**IZJAVA O KORIŠĆENJU**

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

**Istraživanje postojanosti strugarskog noža u proizvodnim uslovima  
pri ortogonalnom rezanju**

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijano
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poledini lista).

U Beogradu, 02.10.2015. godine

**Potpis doktoranda**  
