

Obrada otvrdnutih materijala

Zubatović, Ivica

Master's thesis / Diplomski rad

2008

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:269898>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Ivica Zubatović

Zagreb, 2008.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada:
Prof.dr.sc. Damir Ciglar

Ivica Zubatović

Zagreb, 2008.

SAŽETAK RADA

Pod pojmom obrada otvrdnutih materijala podrazumjeva se obrada materijala čija se tvrdoća nalazi u rasponu 45 – 65 HRC. Obrada otvrdnutih materijala je omogućena razvitkom materijala reznih alata, a to su prvenstveno keramika i CBN. Tvrdo tokarenje je jedan od postupaka obrade otvrdnutih materijala kojim se u prvom redu smanjuju troškovi i vrijeme proizvodnje.

U radu su prikazane osnovne karakteristike postupka tokarenja, visokobrzinske obrade, te tvrdog tokareja. Prikazane su i karakteristike alata i materijala alata koji se koriste u postupcima tokarenja i tvrdog tokarenja. Nakon teoretskog dijela, izvršeno je ispitivanje utjecaja promjene režima obrade (posmaka, dubine rezanja i brzine rezanja) na vrijednosti sila rezanja i površinske hrapavosti.

U eksperimentalnom dijelu rada su prikazani rezultati mjerenja sila rezanja i površinske hrapavosti dobiveni pri obradi s reznom pločicom od keramike CNGA 120408 TIN 22 (polumjer vrha alata $r_e = 0,8$ mm) i CNGA 120404 TIN 23 (polumjer vrha alata $r_e = 0,4$ mm), te je ispitana krutost naprave za prihvat mjerača sila na tokarskom obradnom centru SBL-500 i to uspoređujući eksperimentom dobivene vrijednosti sila i hrapavosti za dva slučaja. U prvom slučaju (Eksperiment 1), mjerač sila je postavljen vertikalno na revolversku glavu, dok je u drugom slučaju (Eksperiment 2) isti mjerač sila postavljen na napravu za prihvat mjerača sila u horizontalni položaj. Prikazana je usporedba rezultata mjerenja pri obradi reznom pločicom od keramike (CNGA 120408 TIN 22) i pri obradi reznom pločicom od CBN-a (WNMA 080408 CBN300), gdje je polumjer vrha alata za obje pločice $r_e = 0,8$ mm.

Eksperiment je proveden u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, pri čemu je korištena raspoloživa mjerna oprema. Rezultati su prikazani tabelarno i grafički. Rezultati ispitivanja vrijede samo za promatrane uvjete rezanja, korišteni alat i materijal.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA	VI
IZJAVA	VIII
1. UVOD	1
2. TEHNOLOGIJA OBRADJE POSTUPKOM TOKARENJA	4
2.1. Osnove teorije rezanja	4
2.1.1. Osnovna geometrija alata za tokarenje	4
2.1.2. Materijal reznog alata	7
2.1.3. Parametri režima obrade	12
2.1.4. Trošenje alata	15
2.2. Kvaliteta obrađene površine	17
2.3. Sile pri rezanju	18
2.3.1. Osnove mehanike rezanja	18
2.3.2. Utjecajni faktori na sile rezanja	20
3. VISOKOBRZINSKA OBRADA	23
3.1. Prednosti i nedostaci visokobrzinske obrade	25
3.2. Zahtjevi alatnog stroja	26
4. POSTUPAK TVRDOG TOKARENJA	29
4.1. Prethodna istraživanja parametara obrade kod tvrdog tokarenja	31
4.1.1. Sile rezanja	32
4.1.1.1. Utjecaj brzine rezanja i posmaka na sile rezanja	33
4.1.1.2. Utjecaj reznog alata na sile rezanja	33
4.1.1.3. Utjecaj posmaka i dubine rezanja na sile rezanja	35
4.1.2. Kvaliteta obrađene površine	36
4.1.2.1. Utjecaj geometrije reznog alata na površinsku hrapavost	36
4.1.2.2. Utjecaj parametara obrade na površinsku hrapavost	36
4.1.3. Utjecaj temperature rezanja	37
4.1.4. Trošenje reznog alata	39
4.1.5. Materijali i geometrija reznog alata	40

5. EKSPERIMENTALNI DIO	42
5.1. Sredstva i uvjeti ispitivanja	43
5.1.1. Karakteristike TOC-a	43
5.1.2. Mjerni instrument za mjerenje sila	44
5.1.3. Mjerni instrument za mjerenje površinske hrapavosti	45
5.2. Odabir materijala reznog alata i parametara obrade	46
5.3. Rezultati mjerenja	48
5.3.1. Rezultati mjerenja komponenti sila rezanja pri obradi reznom pločicom CNGA 120408 TIN 22	49
5.3.1.1. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku	49
5.3.1.2. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja	52
5.3.1.3. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja	54
5.3.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti obradka pri obradi reznom pločicom CNGA 120408 TIN 22	56
5.3.2.1. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku	56
5.3.2.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja	58
5.3.2.3. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja	60
5.3.3. Rezultati mjerenja komponenti sila rezanja pri obradi reznom pločicom CNGA 120404 TIN 23	62
5.3.3.1. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku	62
5.3.3.2. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja	64
5.3.3.3. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja	66
5.3.4. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti obradka pri obradi reznom pločicom CNGA 120404 TIN 23	68
5.3.4.1. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku	68
5.3.4.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja	70
5.3.4.3. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja	72
5.4. Usporedba rezultata mjerenja sila rezanja i površinske hrapavosti pri obradi reznom pločicom od keramike (CNGA 120408 TIN 22) i reznom pločicom od CBN-a (WNMA 080408 CBN 300)	74
5.4.1. Rezultati mjerenja sila rezanja	75
5.4.1.1. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku	75
5.4.1.2. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja	76

5.4.1.3. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja	78
5.4.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti obradka	80
5.4.2.1. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku	80
5.4.2.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja	82
5.4.2.3. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja	84
6. ZAKLJUČAK	86
7. LITERATURA	88

POPIS SLIKA

Slika 1. Udjeli troškova proizvodnje	3
Slika 2.a) Tokarski nož s mehanički pričvršćenom reznom pločicom	4
Slika 2.b) Tokarski nož od brzoreznog čelika	4
Slika 2.c) Tokarski nož sa zalemljenom reznom pločicom	4
Slika 3. Osnovni elementi alata za rezanje	5
Slika 4.: Oblici vrha alata	6
Slika 5. Kut nagiba oštrice alata kod tokarskog noža	7
Slika 6. Kutovi na tokarskom nožu	7
Slika 7. Vrste opterećenja i zahtjevi u pogledu potrebnih karakteristika alatnih materijala	7
Slika 8. Područja žilavosti i tvrdoće osnovnih vrsta reznih materijala	8
Slika 9. Prikaz tokarskog noža i obradka u gibanju	13
Slika 10. Prikaz osnovnih elemenata režima rada	14
Slika 11. Teorijska hrapavost obrađene površine	14
Slika 12. Prikaz osnovnih oblika trošenja	16
Slika 13. Parametri trošenja	16
Slika 14. Kvaliteta obrađene površine	17
Slika 15. Zone formiranja odvojene čestice	19
Slika 16. Utjecaj kuta namještanja κ_r na sile rezanja	20
Slika 17. Utjecaj prednjeg kuta γ na sile rezanja	20
Slika 18. Utjecaj kuta nagiba oštrice λ na sile rezanja	21
Slika 19. Utjecaj zaobljenja vrha alata r_ϵ na sile rezanja	21
Slika 20. Ovisnost temperature rezanja o brzini rezanja	23
Slika 21. Podjela područja brzina rezanja za čelik prema Icks-u i Schiffer-u	24
Slika 22. Osnovne karakteristike visokobrzinske obrade	25
Slika 23.a) Glavno vreteno prema Hardingu	27
Slika 23.b) Glavno vreteno na uobičajenim tokarilicama	27
Slika 24. Relativni pomak i otvaranje steznih čeljusti u ovisnosti o frekvenciji vrtnje kod tokarenja	28
Slika 25. Udjeli troškova proizvodnje prema Mercedes Benzu	29
Slika 26. Utjecaj brzine rezanja i posmaka na sile rezanja	33
Slika 27. Ovisnost natražne sile F_p i glavne sile F_c o tipu reznog alata	34

Slika 28. Ovisnost sila rezanja o radijusu vrha rezne oštrice	34
Slika 29. Natražna sila F_p i napadni kut kod tvrdog tokarenja	35
Slika 30. Utjecaj dubine rezanja na sile rezanja	35
Slika 31. Utjecaj parametara obrade na srednje aritm. odstupanje profila Ra	36
Slika 32. Raspodjela temperature pri $v_c=120$ m/min, $a_p=0,3$ mm, $f=0,5$ mm	37
Slika 33. Utjecaj trošenja alata na sile rezanja spri obradi CBN pločicom sa TiN Prevlakom	39
Slika 34. Tipovi vrhova reznog alata	41
Slika 35. Ispitni obradak	43
Slika 36. Tokarski obradni centar SBL 500 proizvođača Trens Trenčin	44
Slika 37. Uređaj za mjerenje sila rezanja	45
Slika 38. Mjerni uređaj u poziciji za mjerenje	46
Slika 39. Keramičke rezne pločice	47
Slika 38. Naprava s vertikalno stegnutim uređajem za mjerenje sila	48
Slika 39. Naprava s horizontalno stegnutim uređajem za mjerenje sila	48
Slika 42. Parametri uređaja za mjerenje sila	49
Slika 43. Sile rezanja u ovisnosti o posmaku za eksperiment 1	50
Slika 44. Sile rezanja u ovisnosti o posmaku za eksperiment 2	50
Slika 45. Segmentirani oblik odvojene čestice pri režimima obrade $v_c = 100$ m/min, $f = 0,06$ mm, $a_p = 0,3$ mm	51
Slika 46. Sile rezanja u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 1	53
Slika 47. Sile rezanja u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 2	53
Slika 48. Kontinuirani oblik odvojene čestice pri režimima obrade $v_c = 100$ m/min, $a_p = 0,8$ mm, $f = 0,08$ mm	54
Slika 49. Sile rezanja u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 1	55
Slika 50. Sile rezanja u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 2	55
Slika 51. Lomljeni oblik odvojene čestice pri režimima obrade $v_c = 100$ m/min, $a_p = 0,8$ mm, $f = 0,08$ mm	56
Slika 52. Ovisnost površinske hrapavosti o posmaku za eksperiment 1	57
Slika 53. Ovisnost površinske hrapavosti o posmaku za eksperiment 2	57
Slika 54. Omatanje kontinuirane odvojene čestice oko noža pri režimima obrade $v_c = 100$ m/min, $a_p = 0,3$ mm, $f = 0,06$ mm	58
Slika 55. Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja za eksperiment 1	59
Slika 56. Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja za eksperiment 2	59

Slika 57. Ovisnost površinske hrapavosti o brzini rezanja za eksperiment 1	61
Slika 58. Ovisnost površinske hrapavosti o brzini rezanja za eksperiment 2	61
Slika 59. Sile rezanja u ovisnosti o posmaku za eksperiment 1	62
Slika 60. Sile rezanja u ovisnosti o posmaku za eksperiment 2	63
Slika 61. Istrošenje vrha alata	63
Slika 62. Sile rezanja u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 1	65
Slika 63. Sile rezanja u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 2	65
Slika 64. Dijagramski prikaz komponenti sila rezanja prilikom pucanja vrha reznog alata pri dubini rezanja 0,6 mm	66
Slika 65. Sile rezanja u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 1	67
Slika 66. Sile rezanja u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 2	67
Slika 67. Površinska hrapavost u ovisnosti o posmaku za eksperiment 1	68
Slika 68. Površinska hrapavost u ovisnosti o posmaku za eksperiment 2	69
Slika 69. Površinska hrapavost u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 1	71
Slika 70. Površinska hrapavost u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 2	71
Slika 71. Puknuće vrha oštrice alata pri režimima obrade $v_c = 100$ m/min, $a_p = 0,6$ mm, $f = 0,08$ mm	72
Slika 72. Površinska hrapavost u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 1	73
Slika 73. Površinska hrapavost u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 2	73
Slika 74. Rezna pločica WNMA 080408 CBN300	74
Slika 75. Ovisnost sila rezanja o posmaku za CNGA 120408 TIN22	75
Slika 76. Ovisnost sila rezanja o posmaku za WNMA 080408 CBN300	76
Slika 77. Ovisnost sila rezanja o dubini rezanja za CNGA 120408 TIN22	77
Slika 78. Ovisnost sila rezanja o dubini rezanja za WNMA 080408 CBN300	77
Slika 79. Ovisnost sila rezanja o brzini rezanja za CNGA 120408 TIN22	79
Slika 80. Ovisnost sila rezanja o brzini rezanja za WNMA 080408 CBN300	79
Slika 81. Obrada reznom pločicom od CBN-a pri režimima obrade $v_c = 140$ m/min, $a_p = 0,3$ mm, $f = 0,08$ mm	80
Slika 82. Ovisnost površinske hrapavosti o posmaku za CNGA 120408 TIN22	81
Slika 83. Ovisnost površinske hrapavosti o posmaku za WNMA 080408 CBN300	81
Slika 84. Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja za CNGA 120408 TIN22	83
Slika 85. Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja za WNMA 080408 CBN300	83
Slika 86. Ovisnost površinske hrapavosti o brzini rezanja za CNGA 120408 TIN22	84
Slika 87. Ovisnost površinske hrapavosti o brzini rezanja za WNMA 080408 CBN300	85

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva reznih materijala	12
Tablica 2. Kemijski sastav materijala obradka	42
Tablica 3. Rezne pločice za tokarenje otvrdnutih materijala	46
Tablica 4. Preporučeni parametri obrade za rezu keramiku	47
Tablica 5. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku - Eksperiment 1	49
Tablica 6. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku - Eksperiment 2	50
Tablica 7. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 1	52
Tablica 8. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 2	52
Tablica 9. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 1	54
Tablica 10. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 2	55
Tablica 11. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 1	56
Tablica 12. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 2	57
Tablica 13. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 1	58
Tablica 14. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 2	59
Tablica 15. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 1	60
Tablica 16. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 2	60
Tablica 17. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 1	62
Tablica 18. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 2	62
Tablica 19. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 1	64
Tablica 20. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 2	64
Tablica 21. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 1	66
Tablica 22. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 2	66
Tablica 23. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 1	68

Tablica 24. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 2	68
Tablica 25. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 1	70
Tablica 26. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 2	70
Tablica 27. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 1	72
Tablica 28. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 2	72
Tablica 29. Rezna pločica za tokarenje otvrdnutih materijala	74
Tablica 30. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku – CNGA 120408 TIN22 ..	75
Tablica 31. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku – WNMA 080408 CBN300	75
Tablica 32. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – CNGA 120408 TIN22	76
Tablica 33. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – WNMA 080408 CBN300	77
Tablica 34. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – CNGA 120408 TIN22	78
Tablica 35. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – WNMA 080408 CBN300	78
Tablica 36. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – CNGA 120408 TIN 22	80
Tablica 37. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – WNMA 080408 CBN300	81
Tablica 38. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – CNGA 120408 TIN22	82
Tablica 39. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – WNMA 080408 CBN300	82
Tablica 40. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja – CNGA 120408 TIN22	84
Tablica 41. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja – WNMA 080408 CBN300	84

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Značenje
a_p	mm	Dubina obrade
b	mm	Širina nedeformirane odvojene čestice
D	mm	Promjer obradka
d	mm	Promjer obrađenog dijela obradka
f	mm	Posmak
F_c	N	Glavna sila rezanja
F_f	N	Posmična sila rezanja
F_p	N	Natražna sila rezanja
F_R	N	Rezultantna sila rezanja
P_r		Osnovna ravnina
P_f		Ravnina kretanja
P_p		Natražna ravnina
P_s		Ravnina Rezanja
P_n		Normalna ravnina
P_o		Ortogonalna ravnina
r_ϵ	mm	Radijus vrha alata
α	°	Stražnji kut
α_n	°	Stražnji kut: mjeri se između A_α i P_r u ravnini P_n
α_f	°	Stražnji kut: mjeri se između A_α i P_r u ravnini P_f
α_p	°	Stražnji kut: mjeri se između A_α i P_r u ravnini P_p
α_o	°	Stražnji kut: mjeri se između A_α i P_r u ravnini P_o
β_n	°	Kut klina: mjeri se između A_α i A_f u ravnini P_n
β_f	°	Kut klina: mjeri se između A_α i A_f u ravnini P_f
β_p	°	Kut klina: mjeri se između A_α i A_f u ravnini P_p
β_o	°	Kut klina: mjeri se između A_α i A_f u ravnini P_o
ϵ	°	Kut vrha alata
Φ	°	Kut smicanja
φ	°	Kut posmičnog gibanja
γ	°	Kut prednje površine alata
γ_n	°	Prednji kut: mjeri se između A_r i P_r u ravnini P_n
γ_f	°	Prednji kut: mjeri se između A_r i P_r u ravnini P_f

γ_p	°	Prednji kut: mjeri se između A_r i P_r u ravnini P_p
γ_o	°	Prednji kut: mjeri se između A_r i P_r u ravnini P_o
Ra	μm	Srednje aritmetičko odstupanje profila
Rq	μm	Srednje kvadratno odstupanje profila
Rp	μm	Maksimalna visina vrha alata
Rt	μm	Teoretska hrapavost
Rt_{\max}	μm	Maksimalna teoretska hrapavost
Rv	μm	Maksimalna visina vrha
Rz	μm	Srednja visina neravnina
v_c	m/min	Brzina rezanja
v_f	m/min	Posmična brzina rezanja
λ	°	Kut namještanja
κ	°	Kut nagiba oštrice

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno, koristeći se znanjem i vještinama stečenim tokom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, te navedenom literaturom.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Damiru Ciglaru na stručnoj pomoći, te nadasve na savjetima za najbrži i najbolji put izrade ovog rada. Također se zahvaljujem stručnom suradniku dipl. Ing. Zlatku Čatlaku na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada, te tehničkom osoblju Laboratorija za alatne strojeve za pomoć prilikom izvođenja eksperimenta.

Zahvaljujem se svima koji su me na bilo koji način, moralno ili materijalno, pomagali tijekom cijelog mog studija.

Na kraju hvala svim mojim kolegama i prijateljima na pomoći, susretljivosti i nesebičnosti, te nezaboravnim trenucima tijekom studija.

1. UVOD

Na život čovjeka i razvoj cjelokupnog društva jedan od najvećih utjecaja ima privredna grana pod nazivom industrijska proizvodnja. Ona donosi kapital i njen razvoj je uzrokovao naglo jačanje kako obradnih sustava, tako i jednog od najraširenijih i najzastupljenijih postupaka obrade dijelova – obrade odvajanjem čestica. Obrada odvajanjem čestica sastoji se od niza različitih postupaka kod kojih se od početnog volumena sirovog materijala odvaja tj. odstranjuje određena količina materijala u obliku odvojenih čestica, a sve u svrhu izrade odnosno formiranja gotovog konačnog izradka. U postupku formiranju izradka i proizvodnom sustavu najznačajniji čimbenici su materijal obradka, rezni alat i obradni stroj ili sustav. Obrada odvajanjem čestica dijeli se na obradu odvajanjem čestica u širem i užem smislu. U užem smislu zove se obrada rezanjem, te se vrši reznim alatima. Rezni alati su sredstva koja dolaze u direktan dodir s materijalom, kojeg oblikuju i utječu na njegovu konačnu formu. Daljnja podjela reznih alata s oštricom je:

- Alati s geometrijski definiranom oštricom (tokarenje, glodanje, bušenje, upuštanje, razvrstavanje, blanjanje, dubljenje, piljenje, provlačenje);
- Alati s geometrijski nedefiniranom oštricom (brušenje, superfiniš, honanje, lepanje).

Zadatak svakog reznog alata za obradu odvajanjem čestica je da ispuni dva osnovna zahtjeva:

- Treba odvojiti određeni sloj materijala s obradka uz nastojanje da skine što veću količinu u jedinici vremena;
- Treba osigurati potrebne dimenzije i odgovarajuću geometrijsku točnost obradka, uz traženu kvalitetu obrađene površine i minimalne troškove obrade;

te rezna oštrica alata treba ispuniti tri važne karakteristike, a to su:

- Otpornost na trošenje;
- Žilavost;
- Održavanje tvrdoće na povišenim temperaturama.

Težište istraživanja i razvoja postupaka obrade odvajanjem čestica je u povećanju iskorištenja obradnih sustava kroz određivanje optimalnih uvjeta obrade. Isto tako danas je nedopustivo razvijati nove tehnologije koje ne udovoljavaju sve većim zahtjevima zaštite okoliša. Danas zaštita okoliša zauzima takvo mjesto u razvoju tehnologije da se od samog početka nastajanja tehnologije vodi računa o njoj. Jedno od rješenja zaštite okoliša dobiva se

uvođenjem obrade bez hlađenja tzv. suhom obradom. Rezultati brojnih istraživanja ukazuju na štetne posljedice i moguće ekološke katastrofe zbog utroška velikih količina sredstava za hlađenje, podmazivanje i ispiranje (SHIP). Svakodnevno se u obradi odvajanjem potroše velike količine SHIP-a što povećava troškove proizvodnje. Pridodajući tome troškove odlaganja otpadnih tekućina koji su u progresivnom porastu, može se uočiti značaj suhe obrade.

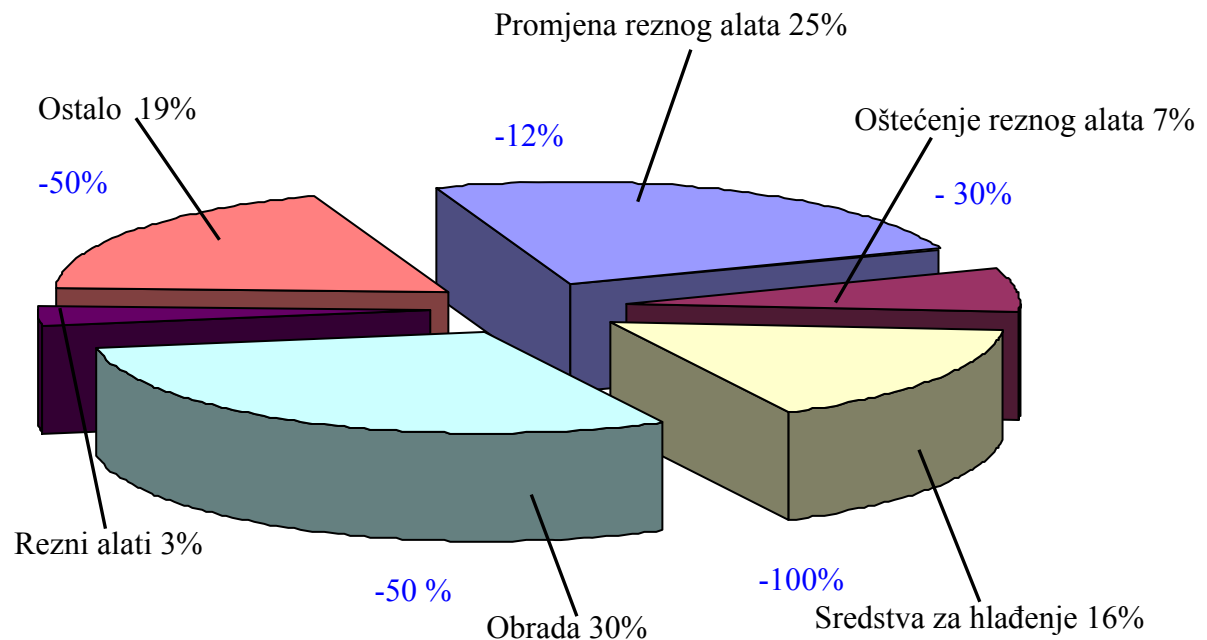
Pod pojmom obrada otvrdnutih materijala ili materijala povišene tvrdoće (hard machining) podrazumijeva se obrada materijala čija se tvrdoća obično nalazi u rasponu 45-65 HRC, odnosno obrada materijala koji su bili toplinski obrađeni (kaljenje) ili materijali na koje se nanose tvrdi površinski slojevi radi poboljšavanja postojećih eksplozijskih svojstava. Obrada otvrdnutih materijala je omogućena razvitkom materijala reznih alata i prevlaka, čija je tvrdoća vrlo velika i postojani su na visokim temperaturama, a to su prvenstveno keramika i CBN. Gledajući kroz povijest, pod ovim pojmom se mislilo na obradu odvajanja brušenjem (obrada geometrijski nedefiniranom oštricom) i odnošenjem (elektrokemijska i elektroerozijska obrada). Razlog tome je bio u slaboj postojanosti reznog dijela alata za druge postupke obrade. Razvojem novih materijala reznog dijela alata i visoko-brzinskom obradom, omogućena je obrada otvrdnutih materijala procesima sa definiranom geometrijom oštrice kao što su tokarenje, bušenje i glodanje. Korištenje takvih obrada ima za posljedicu veliko povećanje profita jer se njihovom uporabom smanjuje vrijeme izrade.

Tvrdo tokarenje (engl. Hard Turning) je postupak koji se razvija kao kompromisno rješenje koje udovoljava prethodno navedenim zahtjevima zaštite okoliša jer je to obrada bez hlađenja tzv. suha obrada. Ono na čemu se gradi razvoj tog postupka je ušteda vremena, smanjenje troškova i zaštita okoliša. Može se reći da je tvrdo tokarenje obrada u jednom ili malom broju prolaza jer je samo potrebno ukloniti deformacije nastale pri kaljenju i poboljšati kvalitetu površine [1].

Smanjenje troškova proizvodnje je prvi i najčešći korak u povećanju proizvodne dobiti. Uvođenjem postupka tokarenja pri obradi otvrdnutih dijelova visokim brzinama, moguće je ostvariti uštede u odnosu na troškove obrade klasičnim tokarenjem, odnosno brušenjem.

Promatrajući iznose pojedinih izvora troškova prema proizvođaču Titex, slika 1, odlučuju se za izvor troškova na kojem je moguća najveća ušteda, a to je ušteda na SHIP-u (100 %) i obradi (50 %). Na slici 1, trošak reznih alata predstavlja samo mali dio ukupnih troškova strojne obrade (3 %), a oštećenje na alatu 7 %. Iako su to relativno mali udjeli, to su

stalni troškovi koji nastaju svake minute, svakog sata, svakog dana itd. Lošim gospodarenjem se na rezne alate može utrošiti nepotrebno velika količina novčanih sredstava, gledajući kroz duži vremenski period [2].



Slika 1. Udjeli troškova proizvodnje [2]

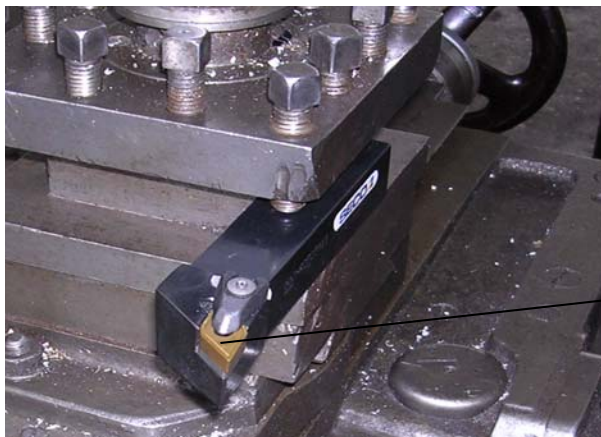
Današnjom tehnologijom tvrdog tokarenja omogućena je mehanička obrada otvrdnutih dijelova kao što su prijenosna vratila, ležajevi, zupčanci, kuglična navojna vreteno itd., u raznim industrijama (automobilska, svemirska, zrakoplovna, alatnih strojeva itd.). Trenutno proizvodna industrija u obradi otvrdnutih komponenti koristi brušenje, a u manjoj mjeri tvrdo tokarenje.

2. TEHNOLOGIJA OBRADE POSTUPKOM TOKARENJA

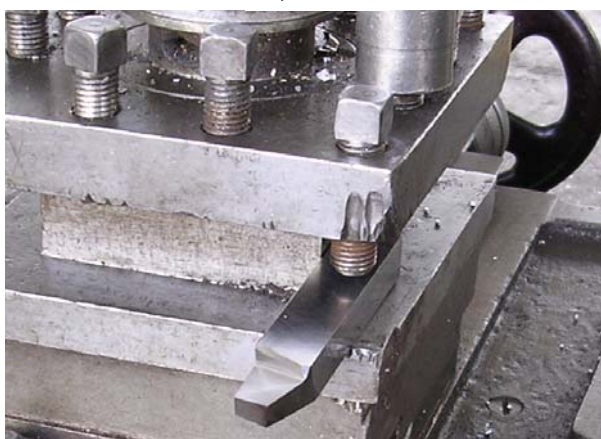
2.1. Osnove teorije rezanja

2.1.1. Osnovna geometrija alata za tokarenje

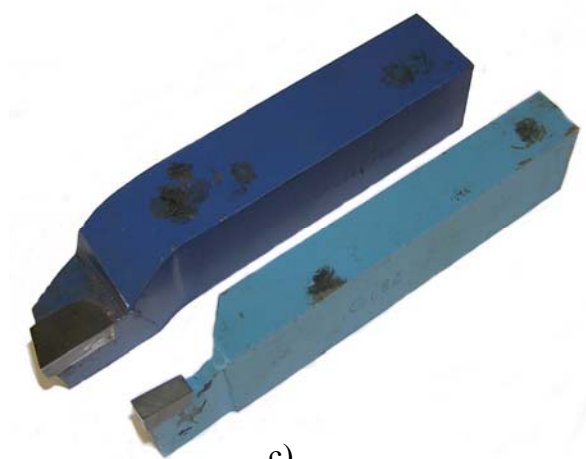
Kod tokarenja se koriste različiti tipovi tokarskih noževa s reznim pločicama, a dijele se prema načinu njihovog pričvršćenja na držač. Tako imamo tokarske noževe sa mehanički pričvršćenom reznom pločicom, slika 2a), tokarske noževe od brzoreznog čelika, slika 2b), i tokarske noževe sa zalemljenom reznom pločicom, slika 2c). Tokarski noževi sa zalemljenom reznom pločicom se sve manje koriste zbog niza nedostataka u odnosu na noževe sa mehanički pričvršćenom reznom pločicom te se kod obrade materijala povišene tvrdoće zbog niza nedostataka ne primjenjuju. Osnovni element svih reznih alata s oštricom je rezni klin. Rezni alati služe za obradu materijala rezanjem (obrada odvajanjem čestica) [3].



a)



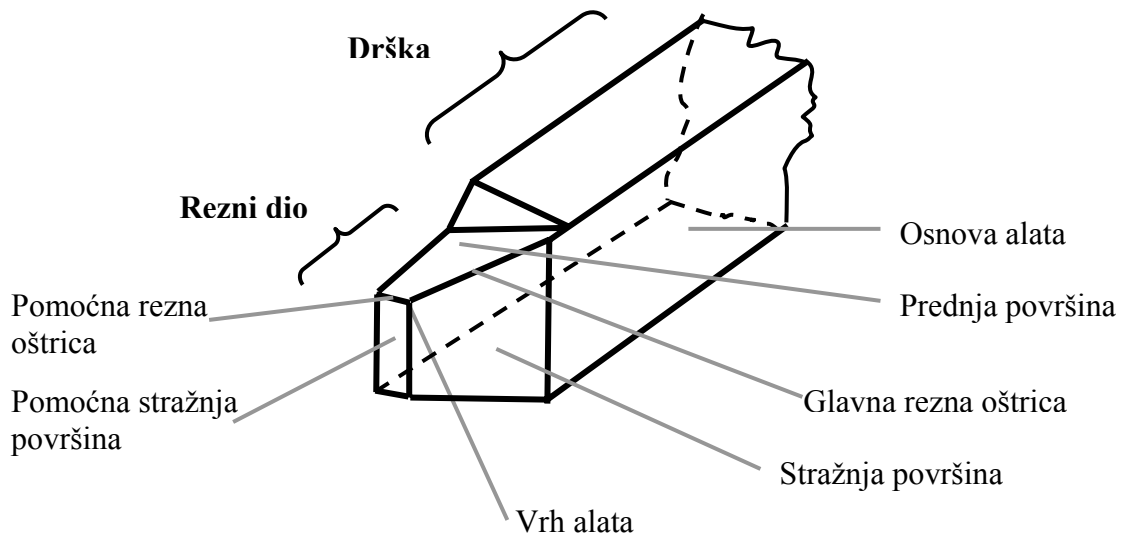
b)



c)

Slika 2. a) Tokarski nož s mehanički pričvršćenom reznom pločicom
b) Tokarski nož od brzoreznog čelika
c) Tokarski nož sa zalemljenom reznom pločicom

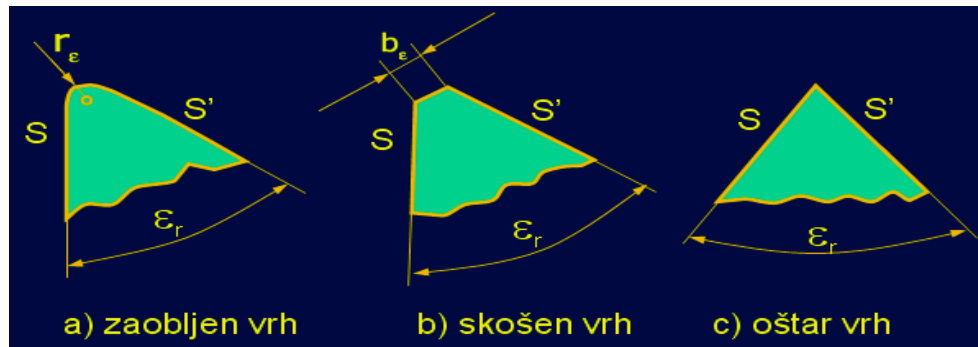
Osnovni elementi alata, kao što su površine, kutevi i oštrice, pojavljuju se kod svih vrsta bez obzira koliko reznih dijelova ima alat. Tokarski nož sastoji se od dva dijela: reznog dijela i drške. Rezni dio obavlja proces odvajanja čestica materijala, dok drška služi za prihvat reznog dijela i pričvršćenje alata na stroj, te za daljnje prenošenje sila na steznu napravu [3].



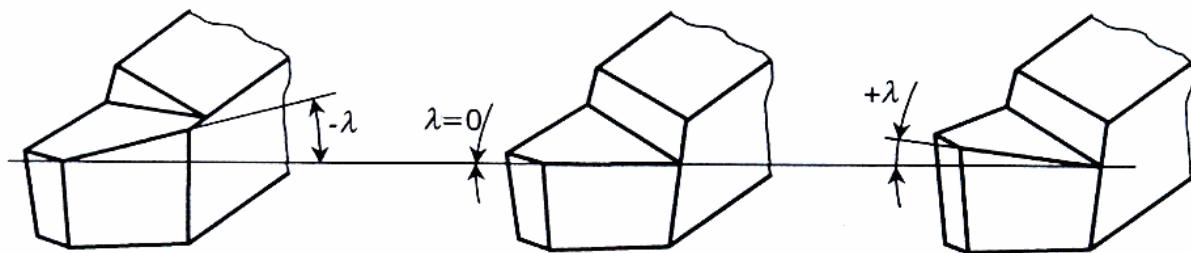
Slika 3. Osnovni elementi alata za rezanje [3]

Rezni dio alata predstavlja prostorni položaj radnih površina alata koje su sastavljene najmanje od *prednje* (A_γ) i *stražnje površine* (A_α). Prednja i stražnja površina tvore rezni klin alata, a presjek prednje i stražnje površine predstavlja centralni element reznog alata, a to je *reznica oštrica* ili *oštrica alata* (S). Prednja i stražnja površina se zovu radne površine alata zato što one neposredno sudjeluju u procesu obrade; prednja površina je u kontaktu sa odvojenom česticom, a stražnja površina sa obrađenom površinom obratka. Prednja površina A_γ i stražnja površina A_α mogu biti dijelovi ravnih ili zakrivljenih površina.

Glavna i pomoćna reznica oštrica formiraju *vrh alata* ε_r , koji može biti zaobljen, skošen ili oštar, slika 4. Oblik vrha alata ima direktan utjecaj na kvalitetu obrađene površine, jer se svojim oblikom direktno reproducira u obrađenu površinu. Osim toga, vrh alata može biti najviša ili najniža točka reznog dijela alata, a s tim u vezi je i kut nagiba *reznice oštrice* λ . Na slici 5 prikazana su tri slučaja, kada je kut nagiba oštrice alata negativan (vrh alata je najniža točka alata), pozitivan (vrh alata je najviša točka alata) i kada je jednak nuli (oštrica alata je paralelna sa horizontalnom – osnovnom ravninom) [3].



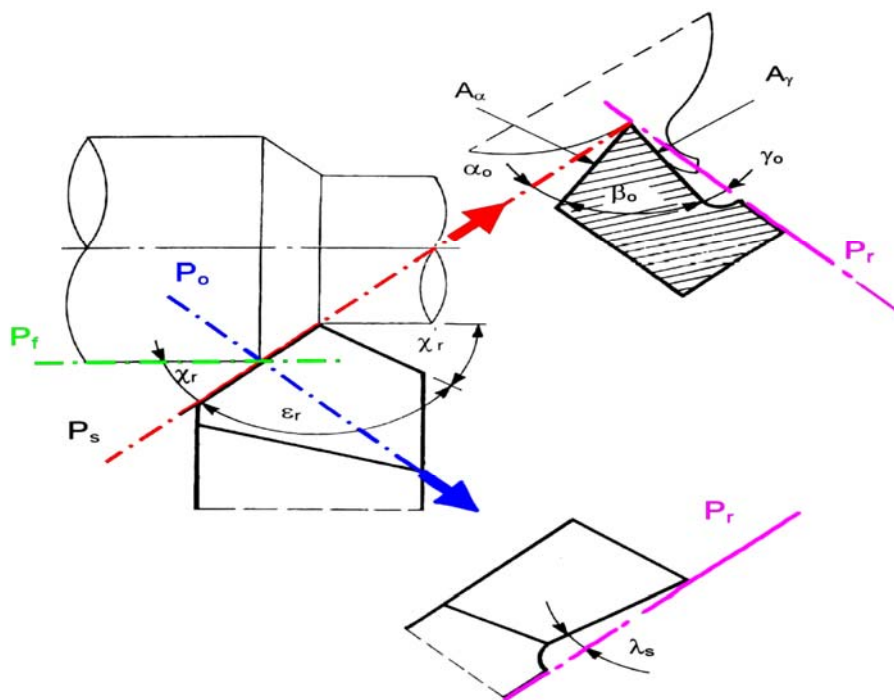
Slika 4.: Oblici vrha alata [4]



Slika 5. Kut nagiba oštrice alata kod tokarskog noža [3]

Kutevi alata, koje prikazuje slika 6, su neophodni za određivanje položaja rezne oštrice, prednje i stražnje površine reznoga dijela alata. Kutovi koji su bitni za tokarski nož su prikazani u ravnini Po i to su:

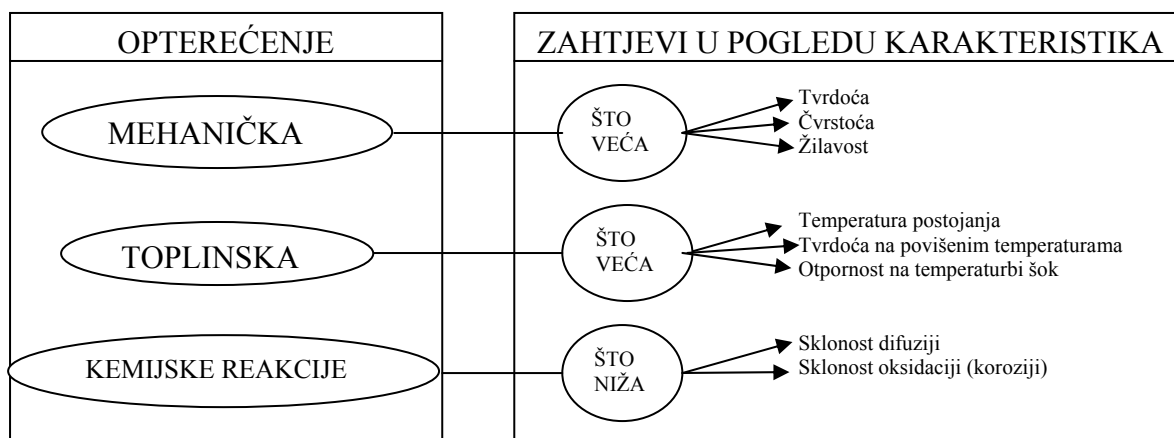
- γ_0 - prednji kut (kut prednje površine); mjeri se između prednje površine alata i osnovne ravnine
- β_0 - kut klina; mjeri se između prednje i stražnje površine alata,
- α_0 - stražnji kut (kut stražnje površine); mjeri se između stražnje površine alata i ravnine rezanja
- κ_r - napadni kut
- ϵ_r - kut vrha alata
- λ_s - kut nagiba oštrice



Slika 6. Kutovi na tokarskom nožu [4]

2.1.2. Materijal reznog alata

Složeni procesi koji vladaju pri rezanju uvjetovali su da alatni materijali moraju zadovoljiti različite zahtjeve kao što su visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, postojanost tvrdoće pri visokim temperaturama, dobro ponašanje pri toplinskoj obradi, žilavost zbog sprečavanja loma alata, oksidacijska postojanost itd. Pregled vrsta opterećenja kao i zahtjeva u pogledu karakteristika materijala reznih alata prikazani na slici 7. [5].

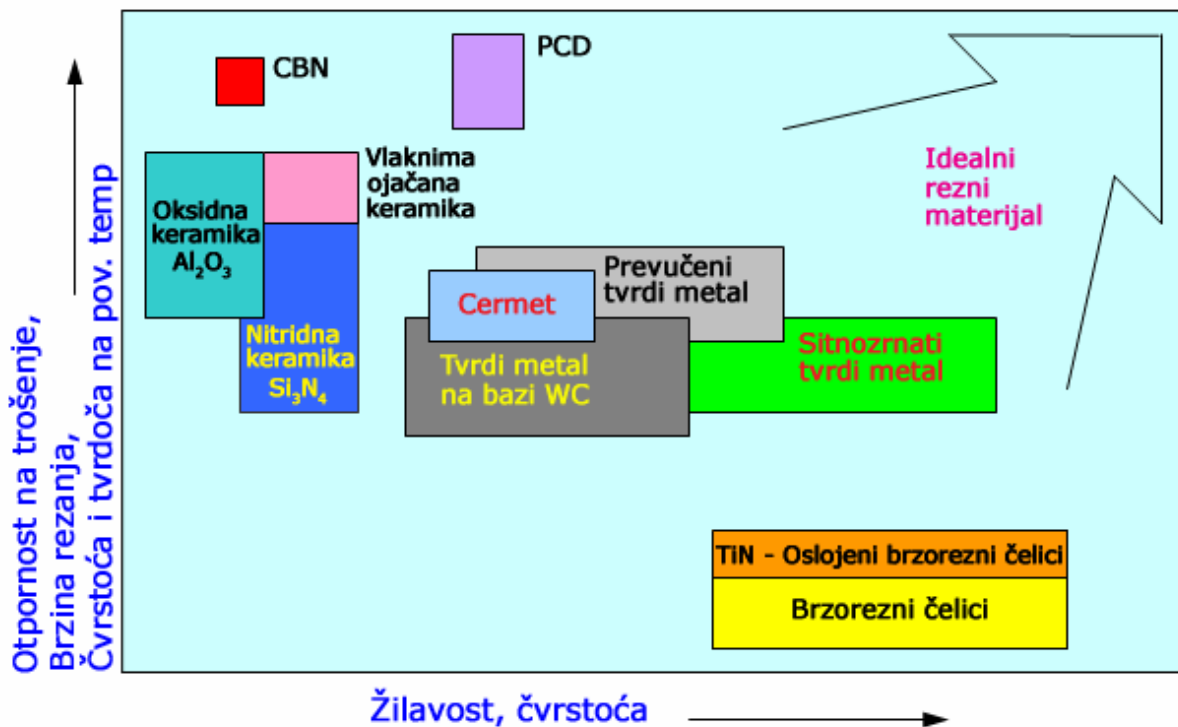


Slika 7. Vrste opterećenja i zahtjevi u pogledu potrebnih karakteristika alatnih materijala [5]

Međutim, dvije karakteristike se mogu izdvojiti kao najvažnije u pogledu reznih sposobnosti materijala alata:

- otpornost protiv trošenja (reзна postojanost)
- žilavost

S obzirom na žilavost (kojom se karakterizira čvrstoća reznog materijala) i s obzirom na tvrdoću (kojom se karakterizira otpornost na trošenje – reзна sposobnost) mogu se definirati područja za pojedine rezne materijale. Upravo ovakva analiza daje zaključke o upotrebljivosti pojedinih reznih materijala s obzirom na konkretne uvjete proizvodne operacije. Na slici 8 prikazana su područja žilavosti i tvrdoće za osnovne rezne materijale. Rezni materijal koji ima istovremeno veliku žilavost, tvrdoću i postojanu tvrdoću na povišenim temperaturama još uvijek ne postoji .



Slika 8. Područja žilavosti i tvrdoće osnovnih vrsta reznih materijala[3]

Materijali oštrice alata mogu biti iz sljedećih skupina alatnih materijala:

- Alatni čelici,
- Brzorezni čelici,
- Rezna keramika,
- Tvrdi metali,
- Cermeti,
- Kubični bor nitrid (CBN) i Polikristalni dijamant (PCD).

Alatni čelici – Predstavljaju prvi rezni materijal i vezani su za prve početke industrijske proizvodnje. Od svih reznih materijala imaju najmanju temperaturnu postojanost, jer već na temperaturama od oko 350 °C, tvrdoća im, sa 55 do 60 HRC opada na 35 HRC, a na temperaturama od oko 400 °C i ispod 20 HRC. U današnjim uvjetima proizvodnje nezamisliva je tako mala brzina rezanja pri kojoj je inače moguća upotreba alatnog čelika kao reznog materijala. U obradi metala rezanjem se više ne koriste, a zadržali su se samo u obradi drveta, papirnoj industriji itd [6].

Brzorezni čelici – Kada se pojavio u prijelazu iz 19. u 20. stoljeće, predstavljao je do tada nezamisliv rezni materijal. Dobio je naziv po tome što je u vrijeme njegove pojave bilo moguće vršiti rezanje velikim brzinama, pa odakle i njegov naziv High Speed Steel – HSS. To su visokolegirani čelici, legirani kromom, molibdenom, volframom, vanadijem, a ponekad i kobaltom. Rezne sposobnosti HSS čelik dobiva pravilno provedenom i veoma pažljivo praćenom termičkom obradom. U usporedbi sa reznim materijalima koji imaju veću temperaturnu postojanost i tvrdoću, kao npr. tvrdi metal, HSS čelik ima neke prednosti, kao što je velika žilavost te laka obradivost u meko žarenom stanju. Međutim, ove prednosti ipak nisu dovoljne s obzirom da brzorezni čelik ima manju otpornost na trošenje i mnogo manju temperaturnu postojanost u odnosu na neke druge rezne materijale [7].

Rezna keramika – predstavlja noviji rezni materijal, koji se u odnosu na druge grane industrije, nešto kasnije počeo koristiti i kao rezni materijal za alate. Prva istraživanja i primjena keramike kao reznog materijala datiraju još od početka dvadesetog stoljeća. Međutim, velika krtoost prvih vrsta bila je glavna prepreka za širu industrijsku primjenu. Keramika je nemetalni materijal dobiven postupkom sinteriranja. Proizvodnja iste se sastoji u očvršćivanju pripremljenog praha i sinteriranju sa ili bez djelovanja sile. S obzirom na sastav postoje dvije vrste rezne keramike:

- Keramika na bazi aluminij oksida (Al_2O_3) – oksidna keramika i
- Keramika na bazi silicij nitrida (Si_3N_4) – nitridna keramika, ili neoksidna keramika.

Najveću tvrdoću ima neoksidna keramika (Si_3N_4), a također i najveću otpornost na termički šok. Ovo izdvaja ovu vrstu keramike kao najboljeg reznog keramičkog materijala [6].

Tvrđi metal (TM) – predstavlja rezni materijal koji se danas najviše koristi u metaloprerađivačkoj industriji. Tvrđi metal je sinterirani materijal sastavljen od karbida volframa, titana, tantala, niobija, molibdena i vezivne metalne osnove, najčešće kobalta. Skoro sve vrste tvrdog metala sadrže volframov karbid (WC), sa ili bez dodatka titanovog (TiC) i/ili tantalovog (TaC) karbida. Struktura TM se može usporediti sa strukturom betona. TM spada u grupu veoma tvrdih materijala otpornih na trošenje i postojanih na visokim temperaturama. TM je prvo razvijen u Njemačkoj 1929. godine sa sastavom od volframovog karbida (WC) i kobalta (Co). Danas negdje oko 50% ukupne godišnje svjetske proizvodnje TM otpada na proizvodnju TM kao reznog materijala. Udio tvrdog metala kao reznog materijala u tehnologiji obrada je oko 33%, a istovremeno, tvrdim metalom skinuta odvojena čestica čini oko 68% od ukupne količine skinute odvojene čestice. Poseban segment u razvoju reznih materijala koji zauzima veoma značajno mjesto je razvoj tehnike nanošenja površinskih prevlaka na tvrdi metal. Svrha površinskih prevlaka sastoji se u povećanju tvrdoće površine, smanjenju trenja, a zadržavanjem žilavosti jezgre alata, postići veću izdržljivost u radu. TM sa ovakvim prevlakama se naziva prevučeni tvrdi metal. Postupci koji se primjenjuju su CVD (Chemical vapor deposition – postupak kemijskog nanošenja iz parne faze) i PVD (Physical vapor deposition – postupak fizikalnog nanošenja u vakuumu). Pločice se prevlače sa aluminij-oksikom (Al_2O_3), titan-nitridom (TiN), titan-karbidom (TiC) i titan-karbonitridom [Ti(C,N)], a debljine slojeva su od 4 – 6 μm i nanose se jednoslojno ili višeslojno [5].

Izvanredna tvrdoća TM uglavnom je posljedica jakih međuatomnih veza u kristalnoj rešetki, zbog čega imaju visoko talište i velik modul elastičnosti, te malen koeficijent toplinskog rastezanja. Zahvaljujući tim svojstvima imaju visoku otpornost na trošenje i podnose visoke temperature [8].

Cermet – predstavlja mješavinu metala ili legure sa najmanje jednom keramičkom fazom. Ime im je složenica početnih slova kombinacije CERamic/METal. Najčešće se za cermet koristi izraz metalna keramika. Cermet je materijal dobiven praškastim sinteriranjem isto kao i TM, te se zbog prisustva keramičke faze postavlja pitanje, da li je cermet tvrdi metal ili keramika? Odgovor da je i jedno i drugo nije točan, te je prikladnije reći da cermet nije klasičan TM, ali nije ni klasična keramika. Rezne karakteristike cermeta su:

- Velika otpornost na trošenje;
- Velika kemijska stabilnost i tvrdoća na povišenim temperaturama;
- Mala sklonost stvaranju naljepka;
- Relativna otpornost na oksidacijsko trošenje.

Tek se u budućnosti očekuje veća primjena ovog reznog materijala. Glavni pravac razvoja je poboljšanje čvrstoće i žilavosti [5].

Kubični bor nitrid (CBN) i Polikristalni dijamant (PCD) – kao što je poznato, najtvrdi poznati prirodni materijal je dijamant. Ono što ograničava njegovu veću upotrebu kao reznog materijala je njegova visoka cijena. Dijamant je alotropska modifikacija ugljika u obliku kubične kristalne rešetke. Sinteriranjem je moguće, na temperaturi oko 2500 °C i tlaku oko 10000 Mpa, dobiti umjetni dijamant. Tako dobiveni dijamant naziva se polikristalni (PCD). PCD se koristi za obradu aluminijskih i njegovih legura, magnezija, bakra, cinka, titana, zlata i srebra te nemetalnih materijala kao što su guma, azbest, tvrdi metal i keramika. Drugi supertvrdi materijal je kubični bor nitrid (CBN). CBN prijenjujemo pri izradi kalupa i alata za oblikovanje, obradi kaljenih čelika i sivog lijeva. Kao generalna ocjena upotrebe PCD-a i CBN-a možemo reći sljedeće. Ono što je bilo nezamislivo prije 30-ak godina, npr. obrada materijala tvrdoće 50, 60 pa i 65 HRC, upotrebom PCD i CBN alata je postala stvarnost. Izuzetne rezne sposobnosti, velika tvrdoća i otpornost na trošenje su rezultat njihovih karakteristika [6].

Izbora materijala za rezne alate mora težiti kompromisu, koji će zadovoljiti uporabnu namjenu alata. Za obradu otvrdnutih materijala ili materijala povišene tvrdoće, na raspolaganju su brojni rezni materijali. Neoslojeni tvrdi metal tipa P preporučuje se za visokobrzinsku obradu čelika zbog toga što ima veći sadržaj titan i tantal karbida. Sitnozrnati tvrdi metal ima kompaktnu strukturu što mu daje veću otpornost od klasičnih, pa su pogodni za dinamička opterećenja kod grube obrade i isprekidanog rezanja. Prevlačenje reznih oštrica tvrdim slojevima smanjuje veličinu abrazivskog trošenja.

Višeslojna TiCN prevlaka je zbog svoje tvrdoće od 3000 do 4000 HV (na sobnoj temperaturi), bolji izbor u odnosu na TiN (2100-2500 HV), ali je oksidacijska otpornost na nižoj temperaturi. Prevlaka od TiNAl je u usporedbi sa navedenima bolji izbor i po svojoj tvrdoći na sobnoj temperaturi 3000-3500 HV i otpornosti oksidaciji (800 °C) [2,4]. Neka od svojstava reznih materijala prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva reznih materijala [3]

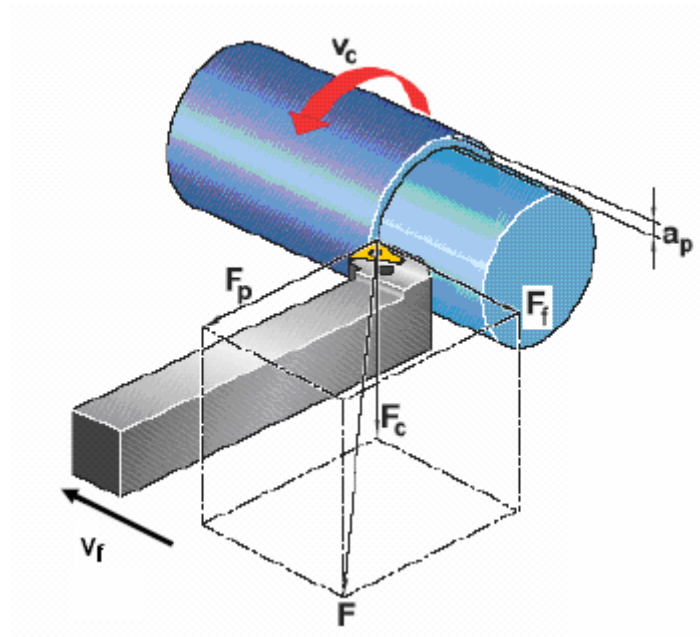
<i>Materijal</i> <i>Svojstva</i>	<i>Dijamant</i>	<i>CBN</i>	<i>Tvrđi Metali</i>	<i>Cermet</i>	<i>Keramika</i> <i>baza Si₃N₄</i>	<i>Keramika</i> <i>baza Al₂O₃</i>
<i>Gustoća, kg/m³</i>	3 500	3 500	14 500	6 800	3 200	4 200
<i>Tvrdoća HV, kg/mm²</i>	10 000	5 000	1 500	1 600	1 600	2 500
<i>Čvrstoća, kg/mm²</i>		110	250	200	120	40
<i>Young-ov Modul</i> <i>Elastičnost, i N/mm²</i>	1 000 000	730 000	600 000	400 000	310 000	360 000
<i>Toplinska vodljivost, W/mK</i>	2 000	50	76	13	40	20

2.1.3. Parametri režima obrade

Postupak obrade omogućen je određenim režimima rada. Za obradu odvajanjem čestica postoje odgovarajući parametri režima obrade čije vrijednosti proizlaze iz mogućnosti tehničkog sustava kojima se rješavaju zadani zahtjevi. Za svaki zasebni slučaj potrebno je što točnije odrediti elemente režima obrade, jer direktno utječu na ekonomičnost obrade. Ekonomičnost obrade ne može se povećati bilo kako jer između pojedinih veličina režima obrade postoji funkcijska zavisnost, iz čega proizlaze pojedinačne vrijednosti. Osnovne veličine koje određuju režim obrade su prema [9] slijedeće :

Brzina rezanja v_c , m/min – je put koji prijeđe glavna oštrica alata u odnosu prema obrađivanoj površini u jedinici vremena. Kako je promjer obratka pri tokarenju različit u pojedinim točkama oštrice noža, u proračun se uzima najveći promjer (slika 9). Kako nož istovremeno obavlja posmično gibanje brzinom v_f , brzina resultantnog gibanja v_e može se odrediti kao relativna brzina između gibanja tokarskog noža i obratka. Brzina v_e se određuje kao vektorski zbroj brzina [9].

$$\vec{v}_e = \vec{v}_c + \vec{v}_f$$



Slika 9. Prikaz tokarskog noža i obradka u gibanju [10]

Brzina rezanja izračunava se iz izraza:

$$v_c = D \cdot \Pi \cdot n$$

gdje je:

v_c – obodna brzina obratka, m/min

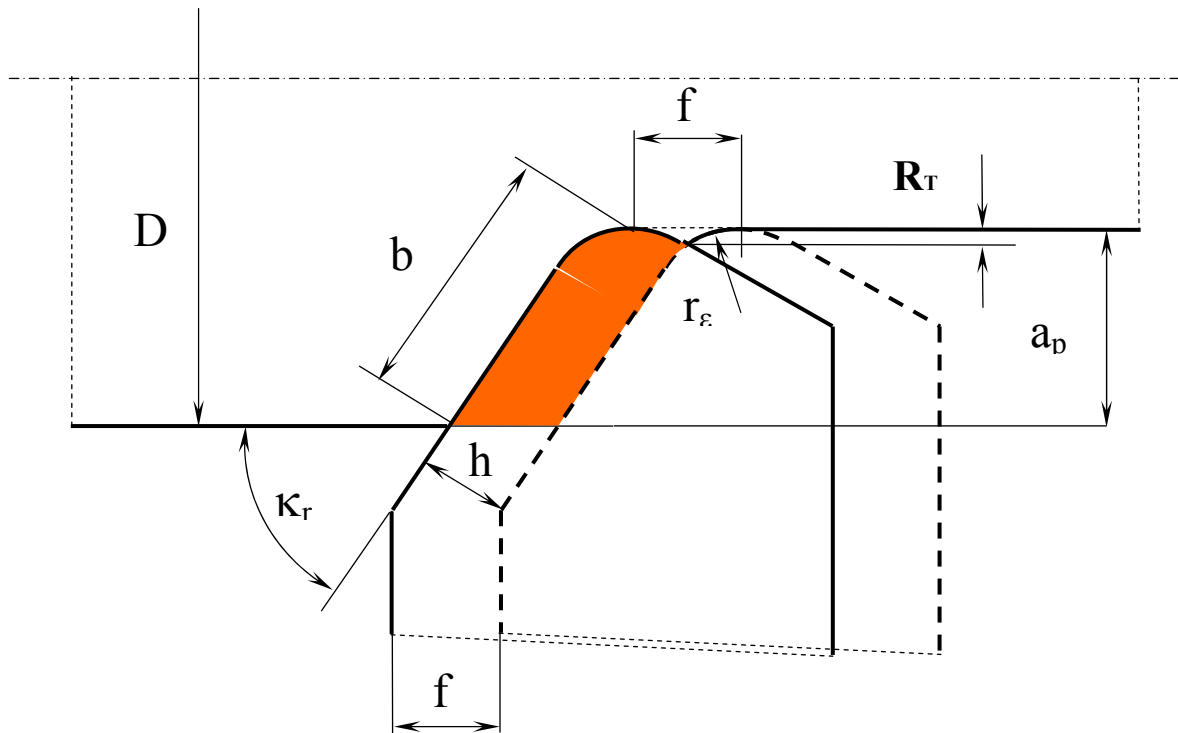
n – broj okretaja obradka, min^{-1}

D – promjer obradka, mm

Zbog toga što je kut pravca glavnog gibanja η malen, brzina rezanja v_c je približno jednaka brzini resultantnog gibanja v_e . Brzina obrade je najznačajniji parametar obrade jer najviše određuje trošenje, tako da i Taylorova jednadžba postojanosti ($V_c T^m = C_T$) uzima u obzir samo brzinu obrade.

Dubina obrade a_p , mm – je sloj odvojenog materijala. Obično je određena veličinom dodatka za obradu, odnosno razmakom između obrađivane i obrađene površine, a mjeri se okomito na obrađenu površinu (slika 10). Limitirana je vitkošću odvojene čestice, odnosno omjerom a_p / f koje obično propisuje proizvođač alata [3].

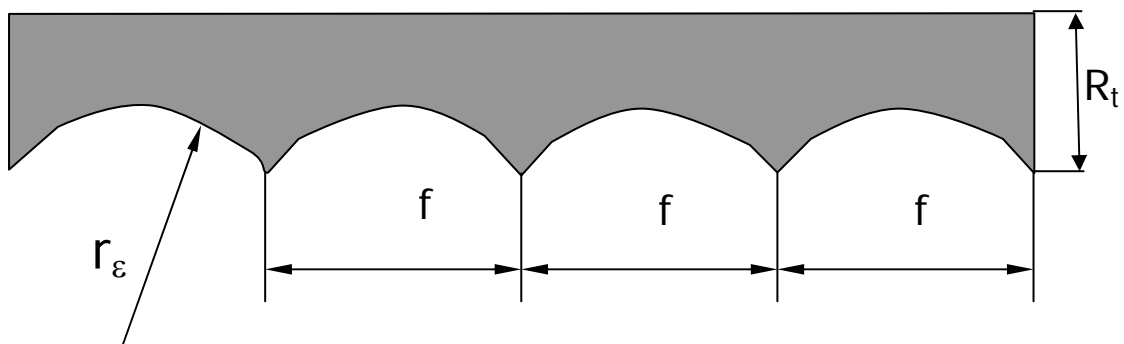
$$a_p = \frac{D - d}{2}$$



Slika 10. Prikaz osnovnih elemenata režima rada [4]

Posmak f , mm – je veličina puta glavne oštrice alata u pravcu posmičnog gibanja alata za jedan okretaj obratka. Pri gruboj obradi veličina posmaka ovisi o materijalu obratka, njegovim dimenzijama, vijeku trajanja noža, dubini rezanja i snazi stroja. Pri prijelaznoj i finoj obradi veličina posmaka ovisi o traženoj kvaliteti obrađene površine. Vrijednost posmaka se može izračunati iz izraza za teoretsku hrapavost [4]:

$$R_{r_{\max}} \cong \frac{f^2}{8r_{\epsilon}}, \quad \text{gdje je } r_{\epsilon} \text{ - radijus vrha alata}$$



Slika 11. Teorijska hrapavost obrađene površine [4]

Temperatura rezanja – je parametar koji se javlja kao posljedica parametara rezanja prilikom procesa. Općenito temperatura ima negativan utjecaj na kvalitetu površine i trošenja alata. Zagrijavanje obradka prilikom procesa u neku ruku ima i pozitivan učinak, poznato je da se porastom temperature materijal mekša, što olakšava proces rezanja. Povećanjem parametara rezanja dolazi i do povećanja temperature rezanja [3].

2.1.4. Trošenje alata

Kod svih procesa obrade odvajanjem pojavljuje se i proces trošenja oštrice reznog alata, a nastaje kao posljedica opterećenja kojima je alat izložen tijekom procesa, slika 12.

Procese trošenja dijelimo na : - procese koji su posljedica mehaničkog djelovanja
- procese koji su posljedica fizikalno, kemijskog djelovanja između alata, obradka i okoline

Proces trošenja uvijek uključuje proces nastajanja pukotine i proces napredovanja pukotine [4].

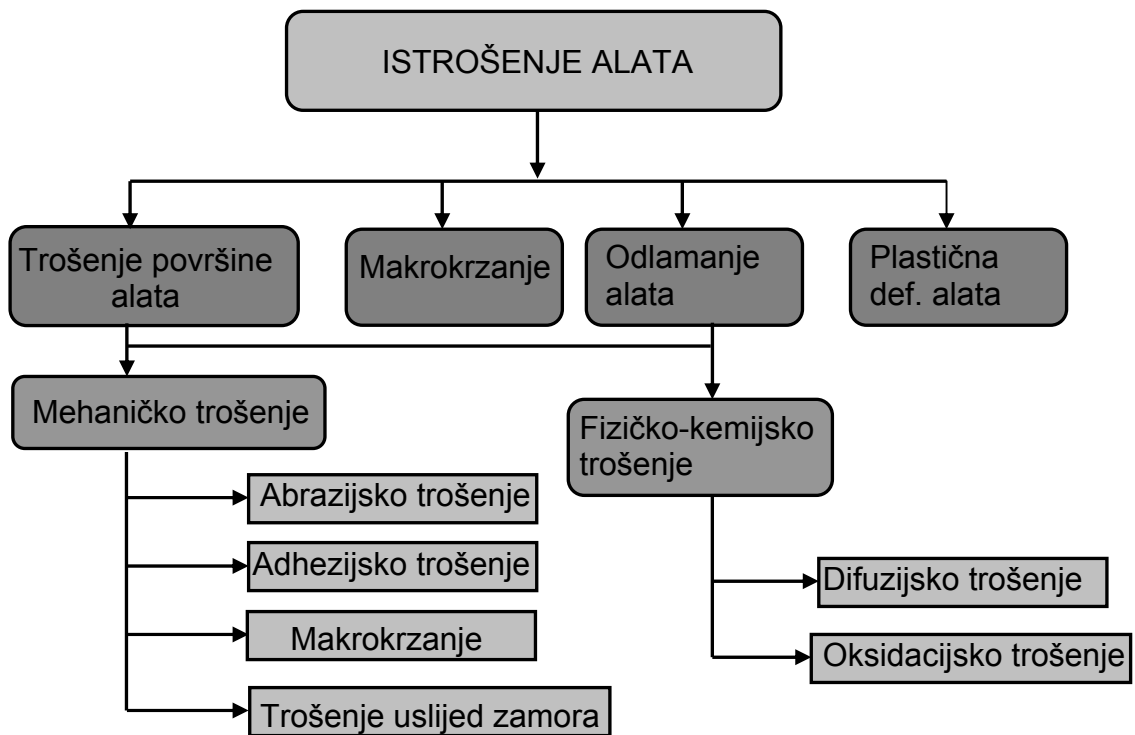
Ulazni parametri koji utječu na istrošenost alata mogu se podijeliti u tri osnovne grupe:

- parametri vezani uz sirovac
- parametri vezani uz alat
- parametri vezani uz uvjete obrade

Važniji parametri kojima se karakterizira obradak, a imaju utjecaj na trošenje alata, mogu se prema [4] svrstati u dvije skupine :

- fizikalno-kemijska svojstva obradka
- geometrijska obilježja obradka

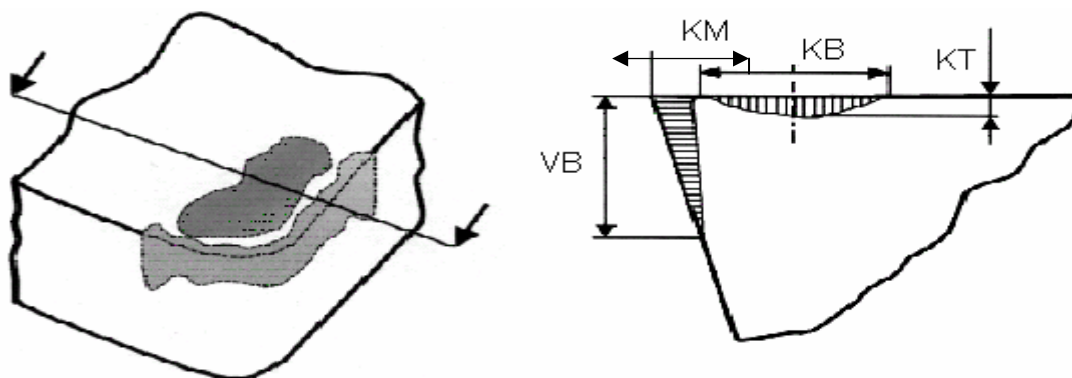
Od fizikalno-kemijskih svojstava značajan utjecaj imaju tvrdoća, čvrstoća, žilavost, kemijska stabilnost, inertnost površine, toplinska provodljivost, toplinsko rastezanje, način dobivanja sirovca, toplinska obrada, mikrostruktura i geometrija (kontinuirana ili isprekidana obrada). Pri tome se mehanička svojstva materijala obradka kao što su tvrdoća, čvrstoća i žilavost izdvajaju kao najvažniji i najutjecajniji parametri. Bolja mehanička svojstva uzrokuju upotrebu reznog alata u težim uvjetima (veća naprezanja alata), što je praćeno intenzivnijim trošenjem. Geometrijski oblik obradka može u određenim uvjetima biti uzrokom da neke, inače kontinuirane obrade, dobiju karakteristike prekidnih obrada što utječe na promjenjivo naprezanje alata, a time i na njegovo intenzivnije trošenje.



Slika 12. Prikaz osnovnih oblika trošenja [4]

Trošenje alata je nepoželjan i nepovratan proces pri čemu se smanjuju njegova rezna svojstva. Alat se pri obradi troši nekim od mehanizama prikazanih na slici 12, dok dopuštena vrijednost istrošenja reznog alata uglavnom ovisi o: tolerancijama obrađene površine, hrapavosti, čvrstoći rezne oštrice, efektivnosti i proizvodnosti obrade odvajanjem.

Parametri trošenja mogu poslužiti kao kriteriji istrošenosti alata. Istrošenje alata mjeri se jednodimenzijskim veličinama (VB , VB_{max} , KT , KM , KB) ili dvodimenzijskim veličinama na stražnjoj površini rezne oštrice, površinskim istrošenjem ($A_{istroš}$). Istrošenje alata uglavnom se iskazuje jednodimenzijskim istrošenjem i to sa istrošenjem stražnje površine rezne oštrice (VB) [4,9].



Slika 13. Parametri trošenja [9]

2.2. Kvaliteta obrađene površine

Pod pojmom kvaliteta obrađene površine podrazumijeva se fizikalno-kemijsko i mehaničko stanje površinskih slojeva, te geometrija površine obradka, slika 14. Kvaliteta obrađene površine je važan kriterij za ocjenu obradivosti nekog materijala. Osim za ocjenu obradivosti materijala ona ima utjecaj na eksploatacijska svojstva strojnih elemenata. Kvaliteta obrađene površine utječe na otpornost na trošenje, čvrstoću steznog spoja, korozijsku otpornost itd. Pri obradi se na materijalu događaju određene promjene koje zahvaćaju površinske slojeve veće ili manje dubine, što ovisi o načinu i režimu obrade, krutosti alatnog stroja i reznog alata te o geometriji i stanju rezne oštrice. Taj sloj treba smatrati sastavnim djelom obrađene površine, a može imati pozitivan ili negativan utjecaj na svojstva strojnih dijelova.

Na današnjim tokarilicama može se dostići razina kvalitete IT4, što se može uspoređivati sa kvalitetom brušene površine. U literaturi se kvaliteta površine najčešće procjenjuje sa strane površinske hrapavosti [11].



Slika 14. Kvaliteta obrađene površine [11]

2.3. Sile pri rezanju

Osnovne teorijske temelje znanosti o rezanju čine teorija plastičnosti, nauka o toplini, tribologija i nauka o strukturi materijala. Pomoću ovih disciplina objašnjava se priroda procesa rezanja i nastanak pojava u zoni rezanja. Polazeći od teorije plastičnosti, nauke o strukturi materijala i rezultata eksperimentalnih ispitivanja opći tok procesa rezanja može se rastaviti na tri karakteristična procesa: proces početne (elastične) deformacije, proces plastične deformacije reznog sloja u zoni rezanja i, na kraju, proces razaranja materijala, formiranja i odvođenja odvojene čestice izvan reznog klina. Pri tome proces plastične deformacije čini dominantni dio procesa rezanja. Čak se, s obzirom na jako male vrijednosti elastičnih u odnosu na plastične deformacije, kao i to da se praktično cjelokupni rad rezanja troši na plastičnu deformaciju reznog sloja (u zoni rezanja) i na svladavanje otpora trenja, može zanemariti proces elastične deformacije pri rezanju i cijeli proces okarakterizirati kao proces lokalne plastične deformacije. Ovaj proces traje sve do rezanja materijala, tj. do njegovog pretvaranja u odvojenu česticu.

2.3.1. Osnove mehanike rezanja

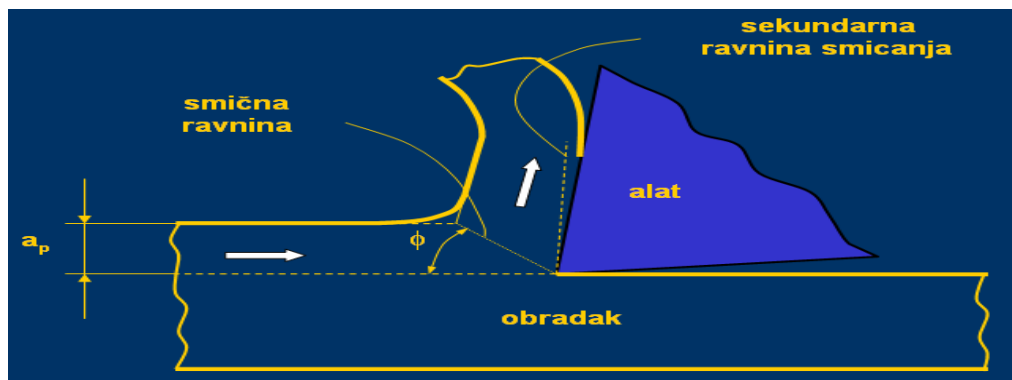
Izrazito velika složenost pojava u zoni rezanja onemogućuje postavljanje pouzdanog, jednostavnog i sveobuhvatnog matematičkog modela naprezanja i deformacije u zoni na osnovu kojeg bi se bolje upoznao i objasnio mehanizam stvaranja odvojene čestice. Povijest znanosti o rezanju poznaje samo približne, pojednostavljene inženjerske teorije pomoću kojih se, manje ili više točno, objašnjavaju mehanizmi formiranja odvojene čestice [12].

Najjednostavniji prikaz mehanizma formiranja odvojene čestice je slučaj ortogonalnog rezanja, kojim se sve sile mogu prikazati u jednoj ravnini, te ako radi jednostavnosti pretpostavimo da sve sile djeluju na vrhu oštrice alata, možemo dobiti kao najvažniju rezultatnu silu F_R [9].

Osnovne pretpostavke (preduvjeti) ortogonalnog rezanja:

- Brzina rezanja okomita je na glavnu oštricu i na posmičnu brzinu rezanja;
- Parametri obrade (a_p, f, v_c) su konstantni;
- Nema trenja na stražnjoj površini alata;
- Smicanje se događa u ravnini;
- Jednolika raspodjela naprezanja;
- Glavna oštrica šira je od širine obrade.

Postoji nekoliko karakterističnih modela procesa plastičnih deformacija u zoni rezanja, tj. modela početka i toka formiranja odvojene čestice [3]. Radovi *Ernsta i Merchanta* sadrže temeljne analize problematike mehanike rezanja zasnovane na modelu jedne ravnine smicanja. U osnovama ove analize sadržan je i kut smicanja Φ kao najvažniji element ovog modela. Značaj kuta smicanja Φ , od velike je važnosti u teoriji obradivosti. On predstavlja osnovnu karakteristiku procesa rezanja, jer se njime definira pravac plastične deformacije u zoni rezanja. On se, pored ostalog, koristi i kao kriterij za ocjenu stupnja obradivosti nekog materijala: pri većim vrijednostima kuta Φ , postiže se veća kvaliteta obrađene površine, manje sile rezanja i trakasti oblik odvojene čestice, dok se pri manjim njegovim vrijednostima povećavaju vrijednosti sila rezanja, smanjuje se kvaliteta obrađene površine, te je stvaranje trakaste odvojene čestice otežano. Za teoretsko razmatranje pojava kod odvajanja čestica materijala poslužit ćemo se najjednostavnijim alatom u obliku klina prikazanim na slici 15.



Slika 15. Zone formiranja odvojene čestice [3]

Odvajanje površinskih slojeva materijala sa reznim alatom moguće je ako se na alat narine sila F koja je jednaka otporu rezanja i silama trenja. Najčešće se vektor sila rezanja rastavlja na komponente sila rezanja. Tako kod kosog rezanja imamo tri komponente sila rezanja (slika 9.):

F_c - glavna sila rezanja te se poklapa sa pravcem vektora brzine rezanja,

F_f - posmična sila rezanja koja djeluje u pravcu uzdužnog posmičnog kretanja alata,

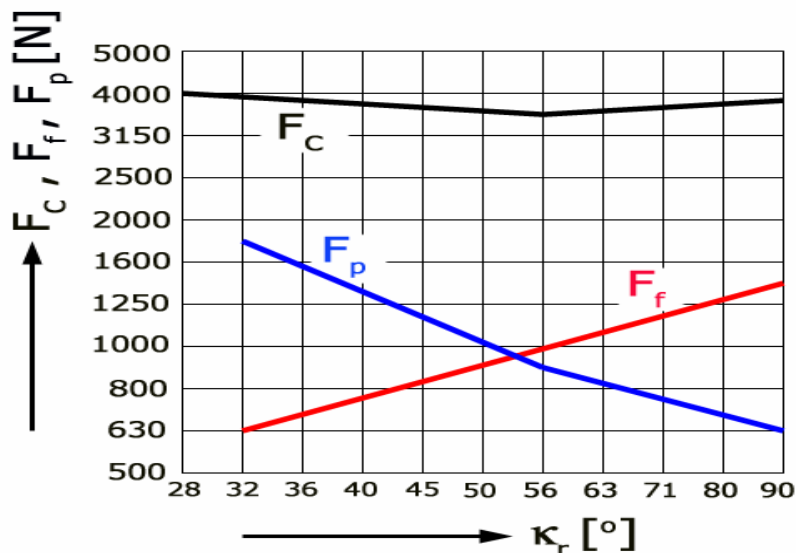
F_p - natražna sila rezanja

$$F_R = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

Sile rezanja i njihovi momenti stoje u direktnoj i indirektnoj vezi sa nizom značajnih fenomena koji prate proces rezanja, kao što su, npr. temperatura u zoni rezanja i njejoj okolini, trošenje reznih alata itd. [12].

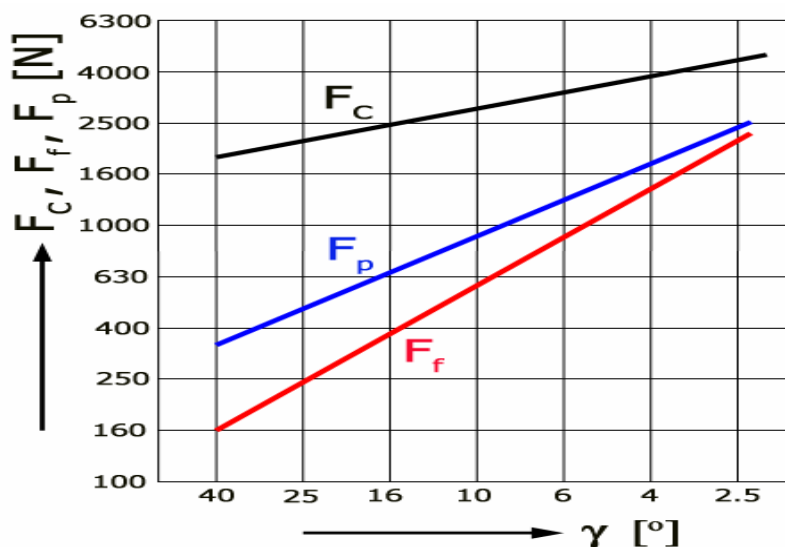
2.3.2. Utjecajni faktori na sile rezanja

Utjecaj kuta namještanja κ_r je takav da se glavna sila rezanja F_c smanjuje s povećanjem tog kuta, teoretski sve do $\kappa_r=90^\circ$. Utjecaj kuta namještanja je također značajan za posmičnu i odzivnu silu (F_f i F_p). Pokusima je pokazano da kod povećanja kuta κ_r posmična sila F_f raste, dok se odzivna sila F_p smanjuje [13].



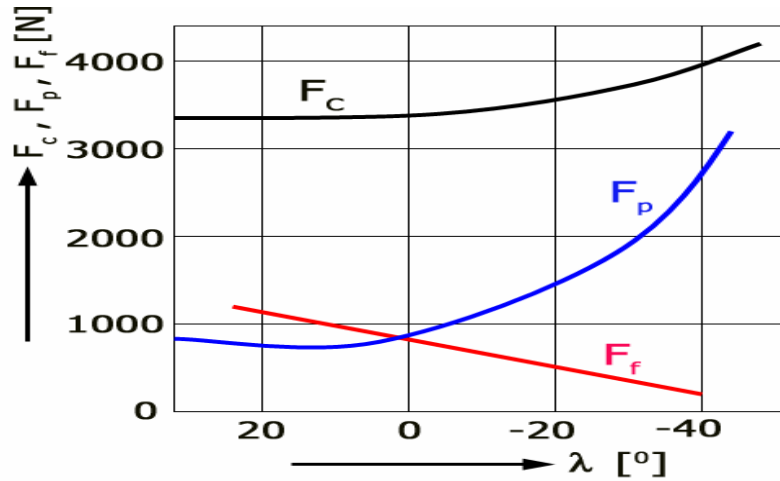
Slika 16. Utjecaj kuta namještanja κ_r na sile rezanja [13]

Utjecaj prednjeg kuta γ na sile rezanja može se vidjeti na slici 17. S smanjenjem prednjeg kuta γ sile rezanja se povećavaju. Međutim, utjecaj prednjeg kuta istovremeno zavisi i od brzine rezanja v_c . Kod većih brzina utjecaj kuta γ je sve manji [13].



Slika 17. Utjecaj prednjeg kuta γ na sile rezanja [13]

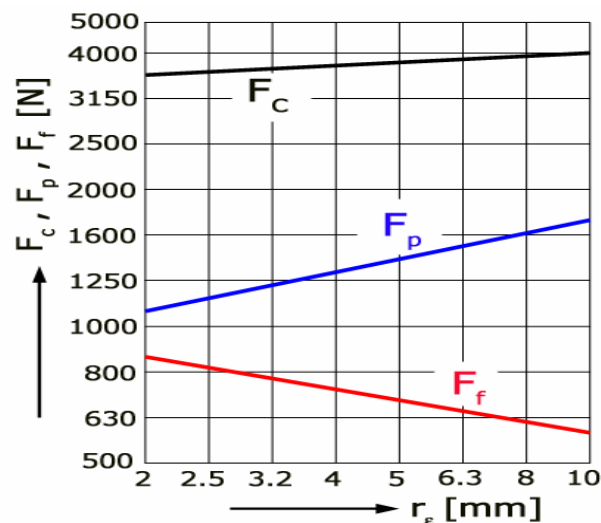
Utjecaj kuta nagiba oštrice λ na sile rezanja je primjetan tek kod velikih nagiba, a praktički nema nikakvog utjecaja u rasponu -10° do $+10^\circ$. Iz slike 18 je vidljivo da se pri velikom negativnom kutu osjetno povećava odzivna sila F_p [13].



Slika 18. Utjecaj kuta nagiba oštrice λ na sile rezanja [13]

Utjecaj stražnjeg kuta α na sile rezanja je minimalan, značajan je jedino u slučaju gdje je tako mali da dolazi do jakog trenja između stražnje površine alata i obratka. Jako veliki stražnji kut je opasan jer smanjuje čvrstoću klina alata [13].

Utjecaj zaobljenja vrha alata r_e na sile rezanja može se vidjeti na slici 19. Glavna sila rezanja F_c povećava se u manjem omjeru, dok povećanje zaobljenja vrha alata r_e ima nešto veći utjecaj na povećanje odzivne sile F_p , te smanjenje posmične sile F_f [13].



Slika 19. Utjecaj zaobljenja vrha alata r_e na sile rezanja [13]

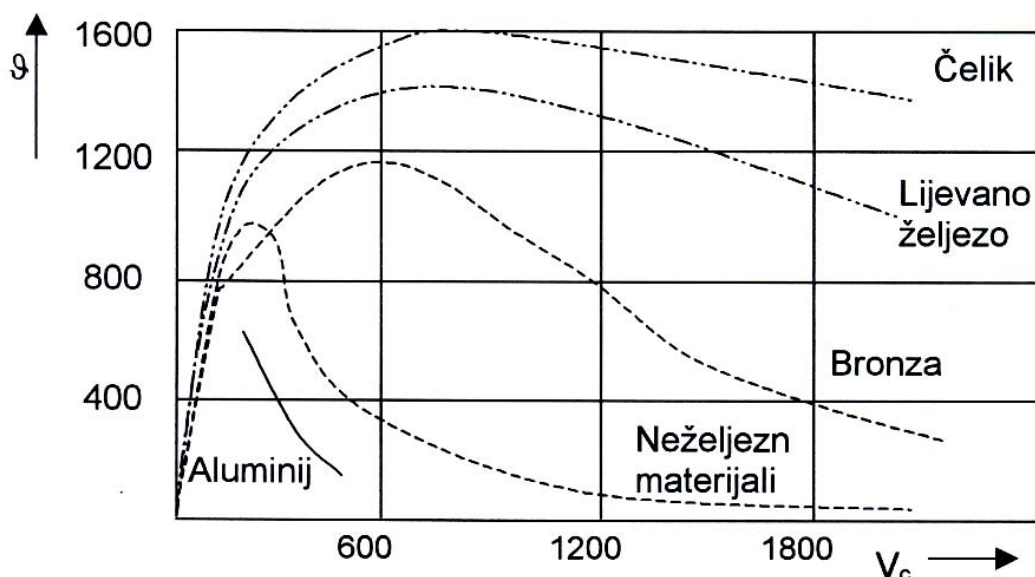
Utjecaj presjeka odvojene čestice. Kod većeg presjeka odvojene čestice A veća je i sila rezanja. Prethodna ispitivanja su pokazala, da se sile rezanja ne povećavaju razmjerno povećanju presjeka odvojene čestice [13].

Utjecaj materijala obratka. Skoro uvijek zapažamo da su sile rezanja veće kod materijala sa većom čvrstoćom, ali to povećanje nije proporcionalno povećanju čvrstoće. Uzrok te pojave je u tome, da se povećanjem tvrdoće materijala smanjuje njegova plastičnost, pa je zato i sabijanje manje. Faktor sabijanja θ smanjuje se kada se povećava kut prednje površine, ali različito za različite materijale [13].

Utjecaj sredstva za hlađenje i podmazivanje. Sredstva za hlađenje i podmazivanje smanjuju vrijednosti sila rezanja u ovisnosti od svog fizičko – kemijskog sastava [13].

3. VISOKOBRZINSKA OBRADA

Premda visokobrzinska obrada VBO ne spada u najnovija istraživačka područja, tek su nedavni gospodarski učinci polučeni primjenom visokobrzinske obrade dali značajan poticaj daljnjim istraživanjima u tom području. Osnove visokobrzinske obrade nalaze se u spoznajama prikazanim na slici 20 koju je 1931. godine objavio Carl Salamon. U toj slici sadržani su rezultati eksperimentiranja s visokim brzinama koje je dvadesetih godina prošlog stoljeća Carl Salamon patentirao. Do tada je vladalo mišljenje, prema Taylor-u, da zbog negativnog utjecaja temperature rezanja povećanje brzine rezanja može ići samo do određene granice, ovisno o materijalu rezne oštrice. Revolucionarna spoznaja bila je u tome da se pri povećanju brzine rezanja temperatura rezanja povećava, ali povećanjem brzine rezanja nakon neke kritične brzine, ovisno o materijalu obrade, temperatura rezanja se smanjuje tj počinje opadati. Ipak za uporabu kod visokih brzina potrebni su odgovarajući materijali reznih alata, koji mogu izdržati visoke temperature rezanja i odgovarajući strojevi zadovoljavajuće krutosti, pa je primjena počela tek ranih šezdesetih godina. Danas je visokobrzinska obrada nužnost i trend budućnosti [14].



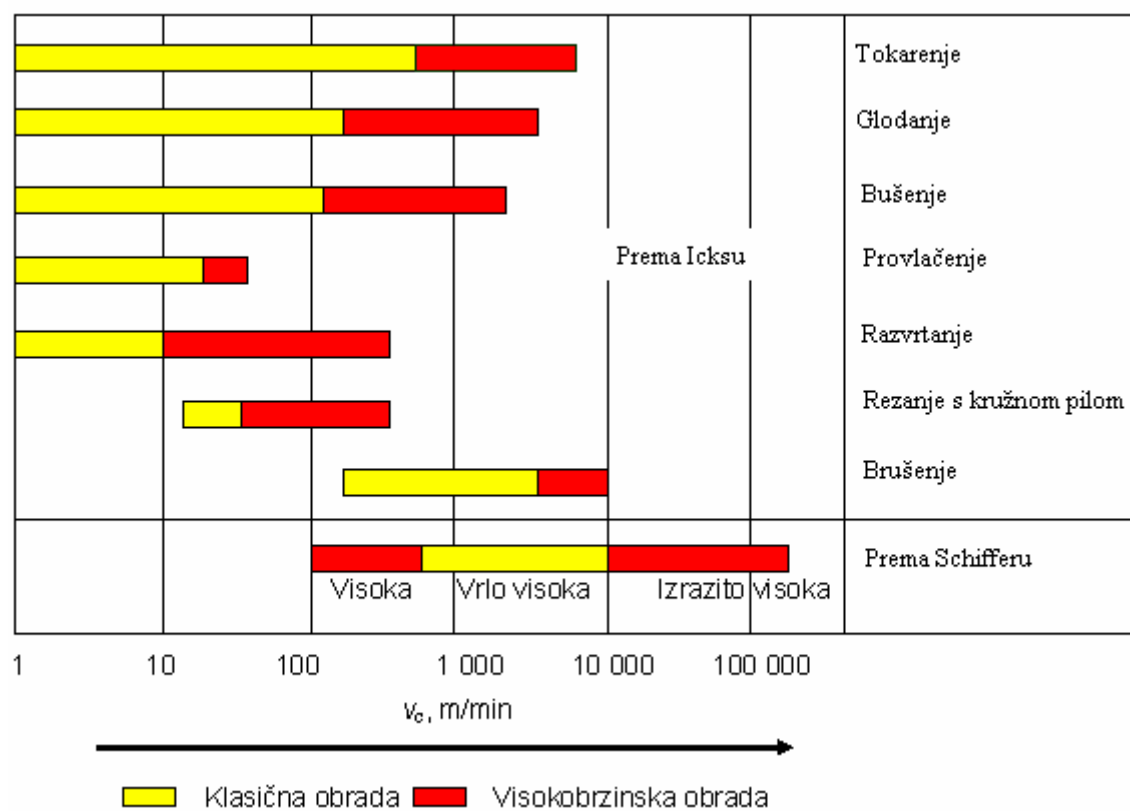
Slika 20. Ovisnost temperature rezanja o brzini rezanja [3]

Definiciju visokobrzinske obrade nije lako dati, tako da imamo autore koji je definiraju pomoću učestalosti vrtnje glavnog vretena koja treba biti preko 8000 1/min, a to nije mjerodavno jer stvarna brzina rezanja koja se može postići ovisna je o materijalu

obradka, načinu obrade, alatu, SHIP-u itd., te se zbog toga definicija visokobrzinske obrade mijenja ovisno o tehnologiji. S druge strane imamo autore koji ju definiraju preko temperature rezanja i to tako da se vjeruje da nakon neke određene brzine rezanja temperatura pri rezanju počinje opadati, kao što je i prikazano slikom 20. Međutim, pod pojmom visokobrzinske obrade rezanjem podrazumijeva se obrada rezanjem uz povećanu brzinu rezanja i povećanu brzinu posmaka. Prema američkoj literaturi, pojam "High Speed Cutting" (HSC) odnosi se isključivo na obradu čeličnih materijala pri brzinama rezanja iznad 500 m/min [15],

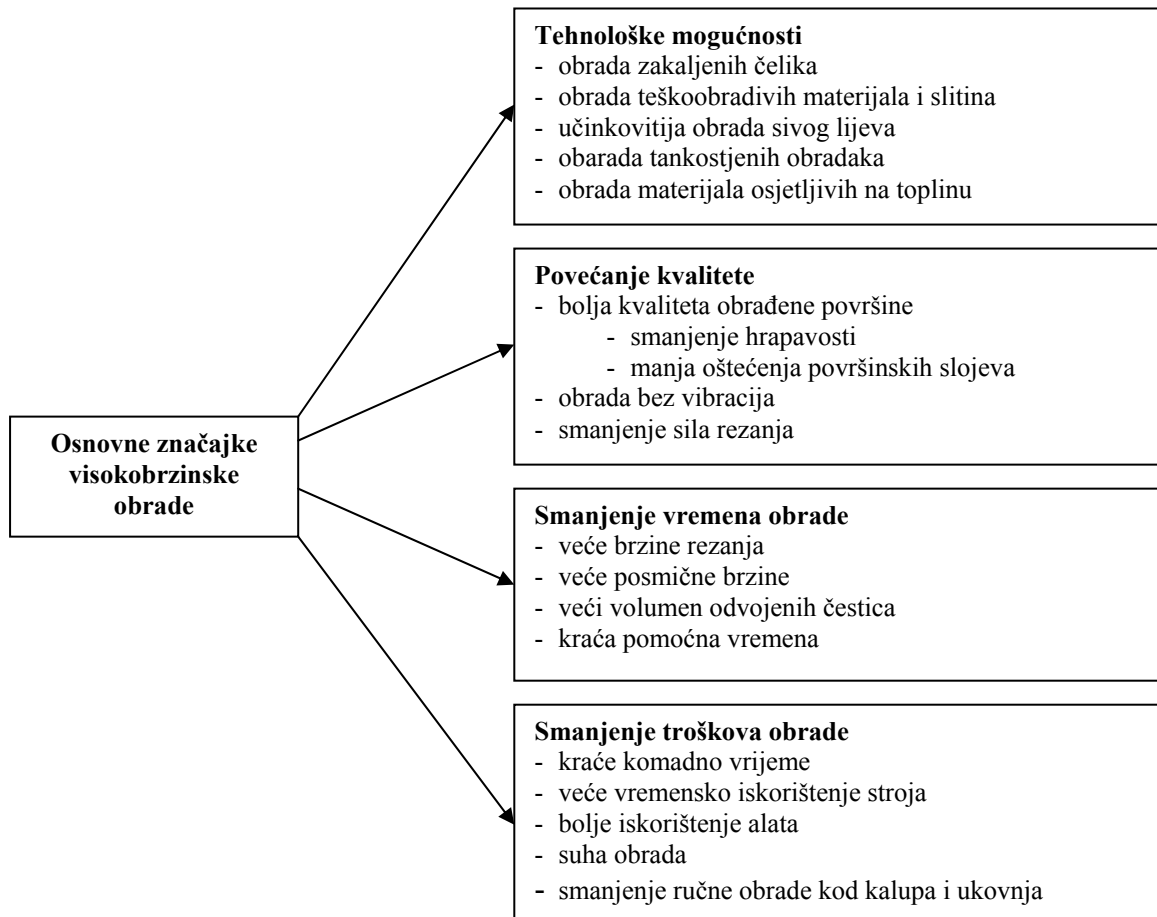
- 1 - klasična obrada, $v_c < 500$ m/min,
- 2 – visokobrzinska obrada, $v_c < 500$ do 1000 m/min,
- 3 - ultravisokobrzinska obrada, $v_c > 1000$ m/min.

Icks je napravio detaljnu podjelu visokobrzinske obrade, ovisno o postupku obrade, koja je prikazana na slici 21. Osim za postupak obrade područje visokobrzinske obrade odnosi se i na određeni obradni materijal, te na određeni rezni alat, pa je moguće postići optimalnu vrijednost istrošenja oštrice ovisno o brzini rezanja i posmaku. Ovako dobivena brzina rezanja je karakteristična brzina visokobrzinske obrade za dani materijal i alat [15].



Slika 21. Podjela područja brzina rezanja za čelik prema Icks-u i Schiffer-u [15]

Istraživanja su pokazala da s povećanjem brzine rezanja raste volumen odvojenih čestica u jedinici vremena, kvaliteta obrađene površine i temperatura rezanja, dok sile rezanja i trajnost alata padaju [15]. Neke od karakteristika visokobrzinske obrade mogu se vidjeti na slici 22.



Slika 22. Osnovne karakteristike visokobrzinske obrade [15]

3.1. Prednosti i nedostaci visokobrzinske obrade

Prednosti visokobrzinske obrade:

- smanjenje vremena obrade, koje rezultira značajnim povećanjem proizvodnosti;
- povećanjem brzine rezanja poboljšava se hrapavost obrađene površine;
- učestalost vrtnje (frekvencija vrtnje) glavnog vretena mnogo je iznad kritičnih frekvencija rotirajućih elemenata alatnog stroja, pa se obrada izvodi praktički bez vibracija. Ovo znatno doprinosi smanjenju hrapavosti obrađene površine, smanjenju trošenja alata te postizanju visoke točnosti;

- što je veća brzina rezanja, manje su sile rezanja, pa je potrebna manja sila stezanja obradka. Ovo omogućuje obradu tankostijenih obradaka uz postizanje visoke točnosti, zbog manjih elastičnih deformacija za vrijeme obradbe;
- Kod visokobrzinske obrade, toplina nastala tijekom procesa najvećim dijelom se odvodi preko odvojene čestice, a obradak i alat ostaju relativno hladni. Ova karakteristika omogućuje obradu materijala osjetljivih na toplinu;
- Moguća je obrada bez SHIP-a, čime se smanjuju troškovi proizvodnje i drži okoliš čistijim;
- Visokobrzinskom obradom uz moderne rezne materijale moguće je obrađivati otvrdnute materijale bez dodatne operacije brušenja.

Nedostaci visokobrzinske obrade:

- Povećani troškovi održavanja, zbog povećanih istrošenja pri velikim brzinama, posebno kod visokobrzinskih vretena;
- Zbog velike produktivnosti, prekid rada ima značajan utjecaj na pad proizvodnosti i povećanje troškova proizvodnje;
- Značajno povećanje ukupne potrošnje energije;
- Operater nema mogućnosti vizualnog praćenja procesa za vrijeme obrade, osim pomoću specijalnih kamera, pa je potreban pouzdan automatski sustav mjerenja obratka i alata;
- iako se visokobrzinska obrada postiže i bez SHIP-a (prvenstveno na finim obradama), za vrijeme grubljih obrada, posebno kod bušenja reznom keramikom, još uvijek su potrebne velike količine SHIP-a. Zbog toga se troškovi (zbog hlađenja) stalno povećavaju;
- trošenje alata se povećava sa povećanjem brzina rezanja, pa su zbog toga potrebni kvalitetniji materijali.

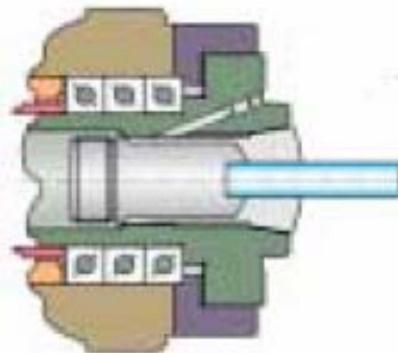
3.2. Zahtjevi alatnog stroja

Da bi se iskoristio potencijal visokobrzinske obrade, alatni strojevi moraju imati potrebna dinamička i kinematička svojstva. Krutost alatnog stroja (CNC-tokarilice) jedno je od ključnih svojstava kod procesa tvrdog tokarenja, osobito zbog postizanja visoke točnosti kod velikih posmaka i brzina. Stroj mora biti u mogućnosti postići zadane brzine rezanja bez

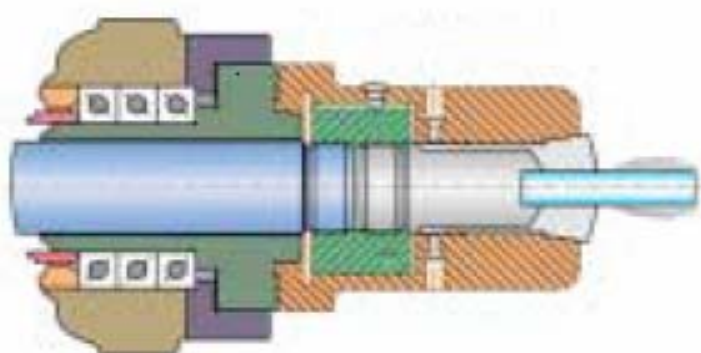
ograničenja. Prema izvještaju Koenig-a, koji ukazuje nužnost svojstava alatnog stroja kao što su ekstremna krutost, visoka snaga i visoka preciznost kod tvrdog tokarenja, razlog tome leži u tome što su rezni alati krhki i skloni lomljenju te stoga nesmije doći do pojave vibracija. Posebno kod završnih obrada, krutost alatnih strojeva igra ključnu ulogu radi dobivanja zadanih tolerancija. Isto tako se traži visoka krutost cijelog sustava za prihvat alata jer se postižu kvalitetniji obradci (vibracije negativno utječu na kvalitetu i učinkovitost alata).

Ako prihvat alata nije adekvatno izveden može doći do poremećaja procesa, a shodno tome i do pojave vibracija pa čak i do loma oštrice alata. Kod tvrdog tokarenja od nosivog dijela alata se očekuje i da bude čvrst radi podnošenja velikih sila koje nastaju tijekom procesa rezanja. Koenig ukazuje da smanjena krutost utječe na povećanje amplituda sila rezanja kao i na veće amplitude vibracija alata. Dakle, ako bi se povećala krutost alatnog stroja, trajnost reznog alata bi se i nekoliko puta povećala [1,16].

Na slici 23a) je prikazana konstrukcija glavnog vretena tokarilice prema proizvođaču Hardinge, koji tvrdi da manja udaljenost između obradka i uležištenja glavnog vretena ima za posljedicu veću krutosti a samim time i poboljšanu kvalitetu izrade obradka u odnosu na uobičajenu izvedbu, slika 23b).



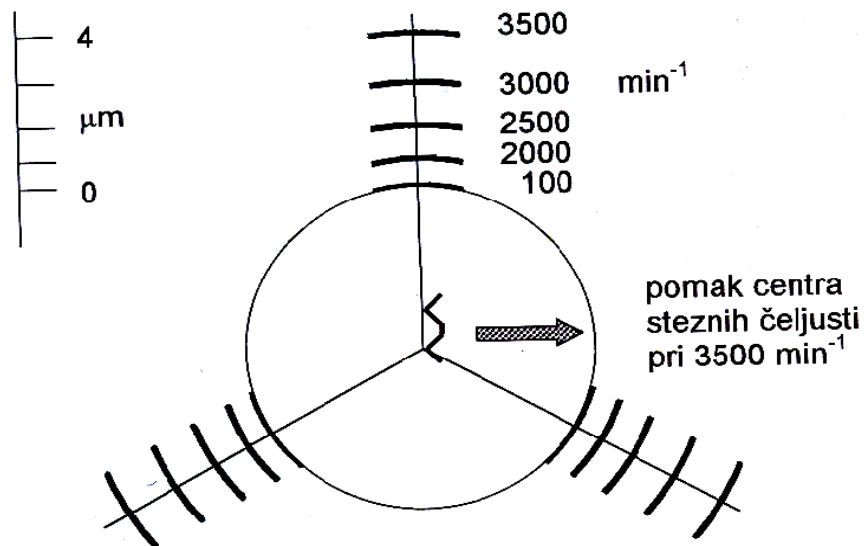
Slika 23.a) Glavno vreteno prema Hardingu [16]



Slika 23.b) Glavno vreteno na uobičajenim tokarilicama [16]

Isti proizvođač je vršio ispitivanja uloge vodilica na kvalitetu obrađene površine. Uspoređivao je hidrostatske vodilice i kotrljajuće (kuglično uležištene vodilice). Rezultat ispitivanja je bio da se primjenom hidrostatskih vodilica postižu dva puta veće kvalitete površine i da je postojanost alata povećana za 38% [16].

Slika 24 pokazuje primjer problema stezanja obratka sa steznim čeljustima koje teže tendenciji otvaranja pri visokim brzinama te smanjuju silu stezanja. Velika centrifugalna sila poništava silu stezanja čeljusti i one se otvaraju. Poseban je problem kod obradaka koji imaju određenu ekscentričnost.



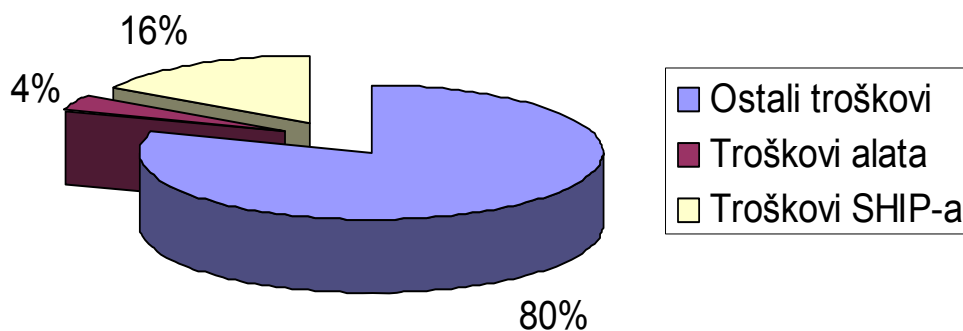
Slika 24. Relativni pomak i otvaranje steznih čeljusti u ovisnosti o frekvenciji vrtnje kod tokarenja [15]

4. OBRADA BEZ HLAĐENJA

Kod velikoserijske i masovne proizvodnje (pretežno u automobilskoj i avionskoj industriji) koristile su se velike količine sredstva za hlađenje ispiranje i podmazivanje (SHIP-a), s ciljem povećanja produktivnosti, točnosti i postojanosti reznog alata. Nedugo su se javili naglašeni zahtjevi za smanjenjem primjene SHIP-a, a posebno u velikoserijskoj proizvodnji, zbog nekih od sljedećih razloga :

1. Visoki troškovi primjene SHIP-a

Smanjenje troškova proizvodnje je prvi i najčešći korak u povećanju proizvodne dobiti. U prikazu na slici 25, troškovi SHIP-a (prema Mercedes Benz) u udjelu troškova proizvodnje iznose visokih 16%. Očigledno bi se njihovom eliminacijom znatno smanjili troškovi proizvodnje.



Slika 25. Udjeli troškova proizvodnje prema Mercedes Benz [3]

2. Štetnost SHIP-a za okoliš

Zaštita okoliša je postala obaveza svih zemalja a pogotovo onih industrijski razvijenijih. Za proizvođače koji koriste SHIP pri obradama to značajno povećava troškove proizvodnje, jer su vlade svih zemalja vrlo rigorozne u mjerama zaštite okoliša. To znači da su troškovi skladištenja i zbrinjavanja SHIP-a te zaštite okoliša značajni i naplaćuju se unaprijed te se zbog tih troškova sve više teži primjeni suhe obrade.

3. Štetnost SHIP-a za čovjeka

Djelovanje SHIP-a na čovjeka smatra se štetnim i izaziva teška oboljenja kože. Prema istraživanjima provedenim u Njemačkoj 50% operatera imalo je ili ima problema s kožnim

bolestima uslijed rada sa strojevima koji su u primjeni imali SHIP. Procjenjuje se da se zbog tih oboljenja godišnje izgubi i do 1 000 000 smjena što je u svakom pogledu veliki broj te samim time i veliki gubitak [3].

Tokarenje je jedan od postupaka obrade odvajanjem gdje se tehnologija obrade bez hlađenja (suha obrada) najlakše primjenjuje. Suha obradu uz gore navedene prednosti ima još i druge. Kod obrade bez hlađenja, temperatura rezanja je velika što može olakšati proces rezanja jer time dolazi do omekšanja obradnog materijala. Suha obrada je izvediva i kod visokih brzina rezanja ispravnim odabirom reznog materijala alata koji posjeduje visoku postojanost na toj visokoj radnoj temperaturi (keramiku nije dobro odabrati kod mokre obrade zbog slabe otpornosti na toplinske šokove). Razne studije pokazuju da je upotreba keramike i CBN-a prikladna za suhu obradu tvrdog tokarenja otvrdnutih čelika zbog toga što se toplina uglavnom odvodi preko odvojene čestice uz pomoć slabije toplinske vodljivosti keramike i CBN alata čime je eliminirana potreba za dodatnim hlađenjem.

Iako suha obrada preko visokih brzina rezanja pruža visoku produktivnost kroz kratko vrijeme ciklusa, fleksibilnost preko CNC tokarilica, smanjenje troškova i ekološke učinkovitosti eliminacijom SHIP-a, ona je još uvijek nova tehnologija kojoj trebaju daljnja istraživanja kako bi se proces učinio stabilnim i integrirao u konvencionalne CNC alatne strojeve.

Željene završne površine i tolerancije za obrađene dijelove suhim tvrdim tokarenjem teško dostižu kvalitetu mokre obrade zbog nesigurnosti u pogledu stabilnosti procesa (ponašanje alata i kvalitete površine izradka). Time je spriječena raširenija upotreba ove tehnologije [1,3].

4.1. Prethodna istraživanja parametara obrade kod tvrdog tokarenja

Tvrdo tokarenje je jedan povoljan praktični proces kojim se u prvom redu smanjuju troškovi i vrijeme proizvodnje strojnih dijelova. U usporedbi sa postupcima brušenja, tvrdo tokarenje pruža slijedeće:

- veću produktivnost kroz kraće cikluse
- veću fleksibilnost preko brojnih operacija na CNC tokarilici
- manje troškove alatnog stroja
- manju potrošnju energije

Tvrdo tokarenje može biti izvedivo i suhom obradom (bez hlađenja), novijim reznim alatima (CBN, razna keramika) eliminirajući tako sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP). Suha obrada je povoljna jer u prvom redu smanjuje troškove, izuzima SHIP koji ima loš utjecaj na čovjekovo zdravlje i štiti okoliš.

Suha obrada tvrdim tokarenjem je jedan izazovan proces, jer da bi se dobila jedna željena kvaliteta obradka (površinska hrapavost i tolerancije) treba se osigurati stabilnost procesa tj. uvijek imamo smetnje koje utječu na tijek procesa kao što su krutost stroja, vibracije i trošenje alata.

Daljnijim razmatranjem faktora kao što su materijal obradka, tvrdoća obradka, materijal reznog alata, geometrija alata, parametri obrade, krutost al.stroja i trošenje alata, tražit će se njihov utjecaj na sile rezanja, točnost obradka, površinsku hrapavost i kakvoću površine (zaostala naprezanja i mikrostrukturne promjene) tj. na cjelokupnu kvalitetu površine. Dobro poznavanje utjecaja ovih faktora uvelike će nam pomoći u održavanju stabilnosti procesa kao i pri daljnjem razvoju tvrdog tokarenja unutar konvencionalnih CNC tokarilica.

Može se reći da je tvrdo tokarenje proces kojim se obrađuje otvrdnuti (zakaljeni) čelični dijelovi tvrdoće veće od 45 HRC, najčešće od 54 HRC do 65 HRC.

Nadalje, tvrdo tokarenje je moguće izvršiti suhom obradom koristeći rezni alat od kubičnog bor nitrida (CBN) jer se toplina nastala tijekom procesa najvećim dijelom odvodi preko odvojene čestice i na taj način je eliminirana upotreba SHIP-a. Za tvrdo tokarenje mogu se koristiti konvencionalni ili CNC strojevi.

Tvrdo tokarenje se osim u različitosti geometrije alata (isključivo negativni prednji kut kod CBN alata) značajno razlikuje od uobičajenog tokarenja i u uvjetima odvajanja

materijala. Toplinom proizvedenom u procesu (veća od topline konvencionalnog tokarenja) omekšava se površina materijala. Zbog omekšavanja i velike brzine rezanja, materijal se lako skida iz zone rezanja.

Uspješnost obrade otvrdnutih materijala leži u traženju optimalne brzine rezanja. Istraživanja pokazuju da postoji područje brzina rezanja u kojem se postiže optimalna postojanost alata i kvaliteta površine.

Dosadašnjim eksperimentalnim istraživanjima proučavala se prikladnost reznih alata za tokarenje zakaljenih čelika. Hodgson je istražio ponašanje CBN alata sa skošenim i oštrim reznim oštricama (vrhovima) i govori da primjena oštrog vrha smanjuje zarezno trošenje, upotrebom negativnog prednjeg kuta došlo je do povećanja vrijednosti sila rezanja. Mnogi istraživači su suglasni da se prilikom procesa tvrdog tokarenja formira oblik odvojene čestice zvan "pila-zubi" tj. isjeckani tip (lošija površinska hrapavost) odvojene čestice koji je nezaobilazan, premda oni daju različita objašnjenja uzroka ovog fenomena. Drugi istraživači su koncentrirani na utjecaj radne temperature i trošenja alata na kvalitetu površine izradka [1].

4.1.1. Sile rezanja

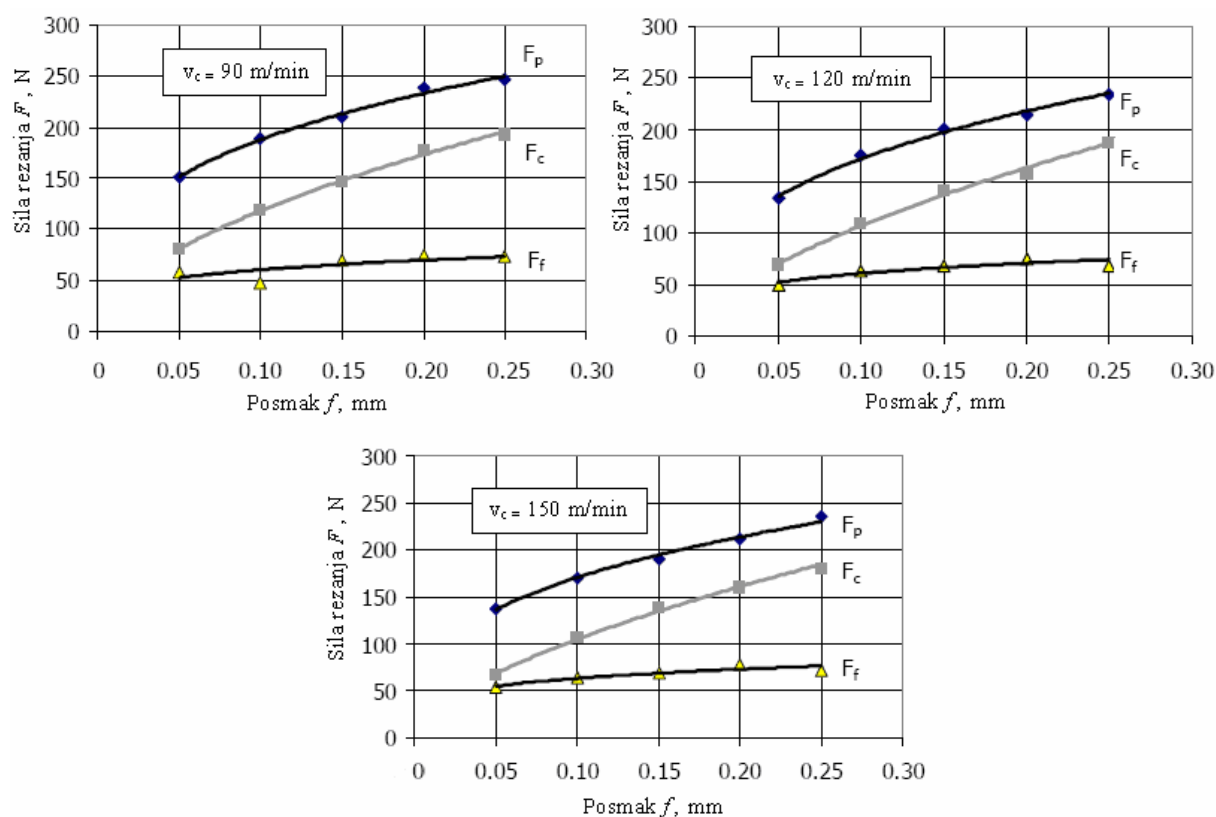
Sile rezanja kod tvrdog tokarenja razlikuju se u odnosu na uobičajeno tokarenje. Kod tvrdog tokarenja najveća je natražna sila F_p , dok je kod konvencionalnog tokarenja najveća glavna sila rezanja F_c . Razlog tome je u geometriji alata jer se formiranje odvojene čestice uglavnom održava na vrhu alata pri negativnim prednjim kutem. Omjer sila F_c/F_p se povećava povećanjem negativne vrijednosti prednjeg kuta. Ako vršimo tvrdo tokarenje pri dubini rezanja većom od 0,2 mm, glavna sila rezanja F_c postat će najveća. Geometrija alata također ima utjecaj i na ostale sile rezanja [16].

Povećanjem zaobljenja rezne oštrice povećavat će se natražna sila, a i glavna sila rezanja. Brojna istraživanja ukazuju da geometrija rezne oštrice ima primarni utjecaj na vrijednosti sila rezanja, a dok parametri obrade sekundarni. Korištenjem CBN alata pokazalo se da udio CBN-a u alatu ima isto utjecaj na sile rezanja. Smanjenjem udjela CBN-a dolazi do smanjenja sila rezanja zbog manje toplinske vodljivosti alata. Toplina se zadržava na površini alata, iz čega proizlazi mekšanje površine obradka, a time i smanjenje sila rezanja. Trošenjem stražnje površine reznog alata dolazi do povećanja sila rezanja i to najviše natražne sile [17].

4.1.1.1. Utjecaj brzine rezanja i posmaka na sile rezanja

Prema mnogim istraživanjima brzine rezanja u području od 50 -110 m/min nemaju značajan utjecaj na promjenu vrijednosti sile rezanja. Tek u području brzina rezanja 80-220 m/min dolazi do značajnijeg pada sile rezanja. Povećanjem posmaka i dubine rezanja dolazi do rasta svih aktivnih sile rezanja [1].

Prema istraživanju [17], gdje se obrađivao alatni čelik tvrdoće 60 HRC pri dubini rezanja 0,2 mm, brzina rezanja ima neznatan utjecaj na sile rezanja dok promjenom posmaka uočava se gotovo linearni prirast sile rezanja. Promjena posmaka ima najmanji utjecaj na posmičnu komponentu sile rezanja, slika 26.

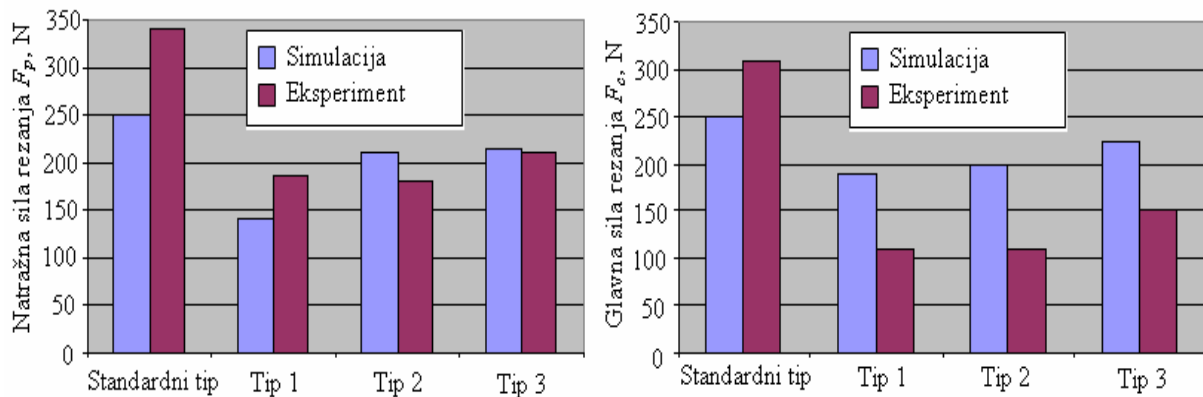


Slika 26. Utjecaj brzine rezanja i posmaka na sile rezanja [17]

4.1.1.2. Utjecaj reznog alata na sile rezanja

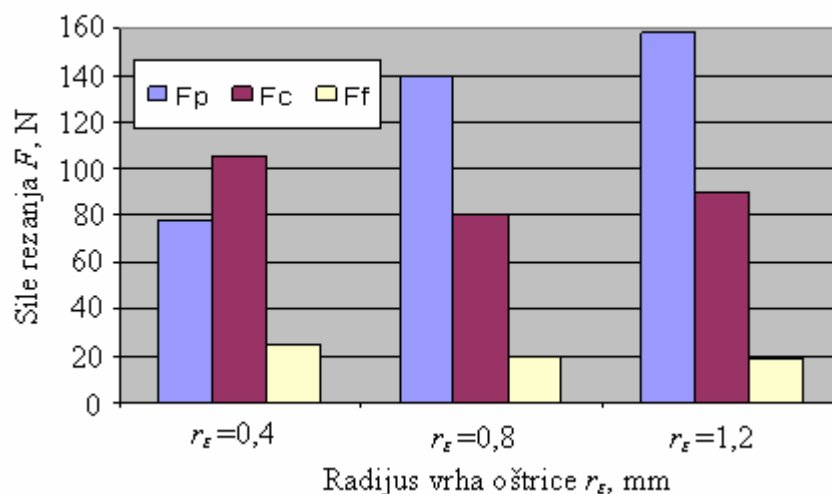
Brojna istraživanja ukazuju da geometrija rezne oštrice ima primarni utjecaj na vrijednosti sile rezanja, a dok parametri obrade sekundarni. E. Uhlmann je istraživao utjecaj različitih tipova geometrije CBN alata, slika 27, pri parametrima obrade $v_c=100$ m/min, $f=0,1$ mm i $a_p=0,2$ mm na alatnom čeliku tvrdoće 52 HRC. Rezultati su pokazali da je natražna sila

bila najveća kod svih tipova alata, a osobito kod upotrebe standardnog tipa alata, slika 27. Rezultati koji su prikazani slikama dobiveni su eksperimentalno i putem nekog simulacijskog softvera [16].



Slika 27. Ovisnost natražne sile F_p i glavne sile F_c o tipu reznog alata [16]

Isti istraživač vršio je istraživanja utjecaja zaobljenja vrha CBN rezne oštrice na sile rezanja, slika 28. Parametri obrade bili su $a_p=0,2$ mm, $f=0,1$ mm, $v_c=120$ m/min. Obradivao se čelik za ležaje JIS SUJ2 tvrdoće 60 HRC.

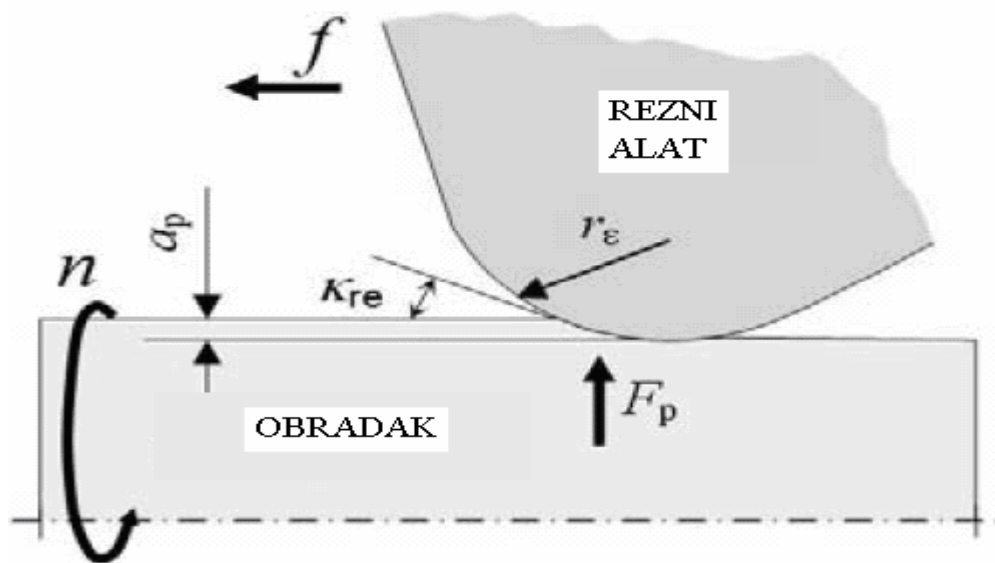


Slika 28. Ovisnost sile rezanja o radijusu vrha reznog alata [16]

Iz slike 28 je vidljivo kako je natražna sila rezanja F_p najveća i da se povećava s povećanjem radijusa oštrice. Glavna sila rezanja F_c pri povećanju radijusa oštrice s 0,4 – 0,8 mm se smanjuje, dok pri povećanju radijusa oštrice s 0,8 – 1,2 mm glavna sila rezanja F_c se povećava, ali u manjem iznosu. Posmična komponenta se neznatno smanjiva, pa se može reći da promjena radijusa rezne oštrice nema utjecaj na posmičnu sila rezanja F_f .

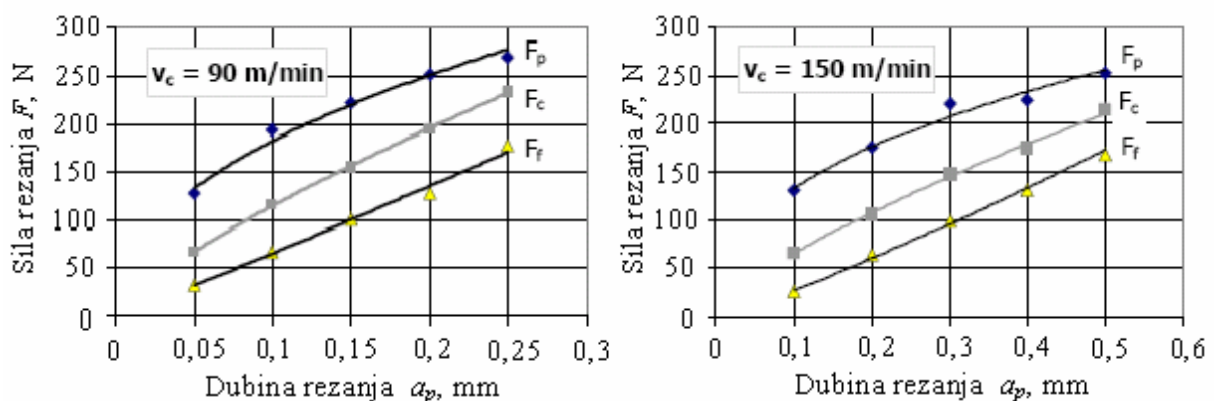
4.1.1.3. Utjecaj posmaka i dubine rezanja na sile rezanja

Kod obrade otvrdnutih materijala značajna je vrijednost komponente natražne ili pasivne sile rezanja F_p . Iza termina pasivna, lako je uočiti komponentu sile koja je u najmanjem djelu sadržana u snazi rezanja. Pasivnu silu rezanja, naime preuzimaju pojedini dijelovi alatnog stroja kao vanjsko opterećenje, a samo jedan dio te komponente (uslijed trenja $F_p \cdot \mu$) može se pridodati otporu rezanja [17]. Promjenom efektivnog napadnog kuta κ_{re} , mijenja se odnos širine i debljine odvojene čestice, uz istu dubinu rezanja i posmak, slika 29 [14].



Slika 29. Natražna sila F_p i napadni kut kod tvrdog tokarenja [14]

Prema istraživanju [17], uočava se gotovo linearni prirast komponenti sile rezanja mijenjanjem dubine rezanja, slika 30. Materijal obradka bio je alatni čelik tvrdoće 60 HRC, a posmak alata $f=0,1\text{mm}$.



Slika 30. Utjecaj dubine rezanja na sile rezanja [17]

Iz slike 30. je vidljivo da sile rezanja rastu paralelno u odnosu jedna na drugu tj. imaju gotovo jednak prirast pri povećanju dubine rezanja, dok brzina rezanja u ovom području ima malen utjecaj na vrijednost sila rezanja.

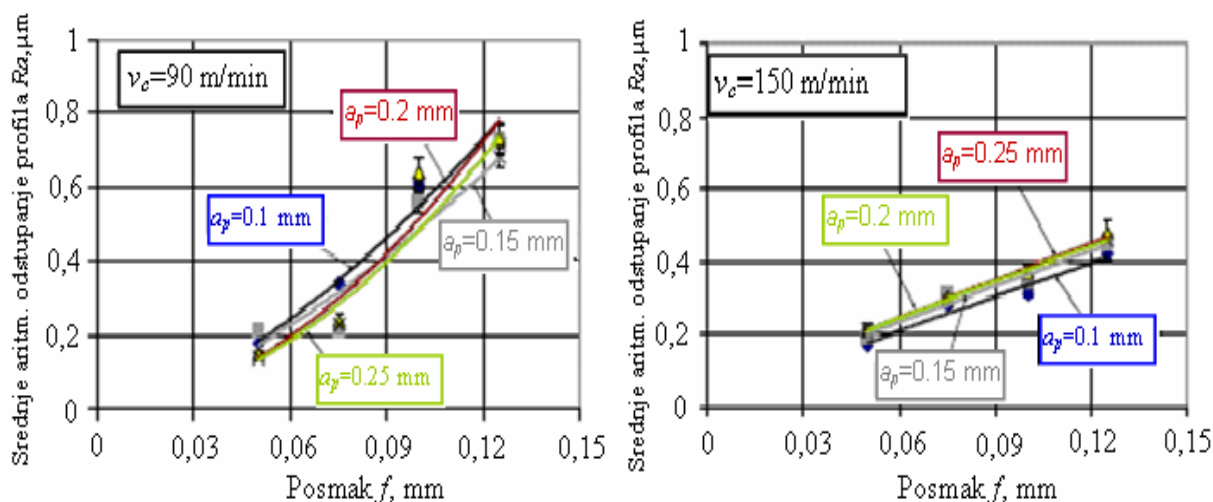
4.1.2. Kvaliteta obrađene površine

4.1.2.1. Utjecaj geometrije reznog alata na površinsku hrapavost

Prema izrazu $R_{T \max} = f^2 / 8 \cdot r_\epsilon$ gdje r_ϵ radijus vrha alata, manje se vrijednosti površinske hrapavosti mogu ostvariti smanjenjem posmaka i povećanjem polumjera vrha alata. Osim ove metode, povećanjem brzine rezanja i odabirom odgovarajuće dubine rezanja također je moguće kontrolirati površinsku hrapavost. U cilju povećanja proizvodnosti kod tokarenja, povećanjem posmaka, određena vrijednost hrapavosti se postiže upotrebom rezne oštrice s većim polumjerom vrha ili upotrebom tzv. Wiper pločice [3].

4.1.2.2. Utjecaj parametara obrade na površinsku hrapavost

Pored geometrije alata, moguće je i brzinom rezanja mijenjati vrijednost površinske hrapavosti. Brzina rezanja je parametar koji uslijed njegovog povećanja od 120 m/min na 180 m/min smanjuje površinsku hrapavost R_a (srednje aritmetičko odstupanje profila) sa $0.7 \mu\text{m}$ na $0.3 \mu\text{m}$ pri obradi Cr-Mo čelika tvrdoće 60 HRC (prema Bhattacharyu) [1]. Posmična brzina je drugi faktor koji može biti značajan za dobivanje dobrih rezultata. Prema istraživanju [17], gdje se ispitivao utjecaj parametara obrade na vrijednost površinske hrapavosti alatnog čelika tvrdoće 60 HRC postignut je slijedeći zaključak, slika 31.

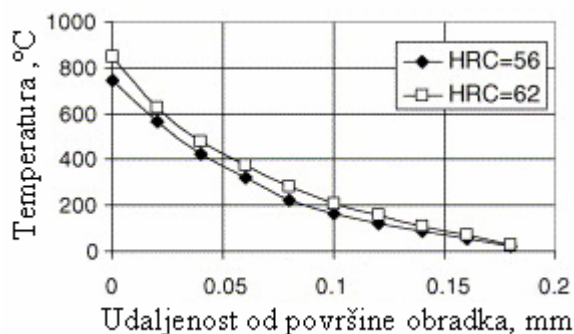


Slika 31. Utjecaj parametara obrade na srednje aritm. odstupanje profila R_a [17]

Površinska hrapavost opada s povećanjem posmaka i brzine rezanja. Promjenom dubine rezanja nema znatnih promijena vrijednost površinske hrapavosti. Promjenom posmaka dolazi do značajnih promjena vrijednosti hrapavosti i može se reći da te promjene slijede linearni tijek.

4.1.3. Utjecaj temperature rezanja

Skoro se sva mehanička energija prilikom procesa rezanja transformira u toplinsku energiju. Porast temperature prilikom procesa nastaje kao posljedica plastične deformacije obrađivanog materijala, trenja između prednje površine i odvojene čestice kao i trenja između stražnje površine alata i obradka. Temperatura rezanja nije smještena duboko ispod površine obradka, slika 32. [18].



Slika 32. Raspodjela temperature pri $v_c=120$ m/min, $a_p=0,3$ mm, $f=0,5$ mm [18]

Uslijed visokih temperatura, dolazi do pojave vlačnih naprezanja površinskog sloja. Poznavanjem temperature rezanja može se predvidjeti trošenje alata, stanje površine i iznos topline koja je smještena u podpovršinskom sloju obradka. Toplinska energija po jedinici dužine (P'_a) je definirana kao jedan fizički parametar koji govori o maksimalnom iznosu temperature podpovršinskog sloja obradka i ukazuje na pojavu bijelog sloja. Ako je prilikom procesa postignuta temperatura pretvorbe α - γ (ferit u austenit) doći će do strukturne promjene obradka. Povećanjem vremena obrade dolazi do linearnog povećanja P'_a . Prema istraživaču Ivett Viktoria, kada je postignuta vrijednost $P'_a=150$ W/mm dolazi do pojave bijelog sloja. Toplinska energija P'_a je jedan fizički parametar koji može biti dan preko jedne empirijske jednadžbe u ovisnosti o brzini rezanja, posmaku i dubini rezanja [14].

$$P'_a = 100 \cdot v_c^{0.41} \cdot f^{0.651} \cdot a_p^{0.236}$$

Uslijed visokih temperatura i topline dobivene tijekom procesa, dolazi do promjene mikrostrukture i tvrdoće obradka. Struktura obrađene površine može se značajno razlikovati

od početnog stanja površine obradka. Kod tokarenja otvrdnutih čelika može doći i do mekšanja površinskog sloja tj. nastat će popušteni martenzit (OTM-overtempered martensite). Ako je postignuta temperatura austenitizacije, razvit će se austenit u površinskom sloju koji uslijed hlađenja, koje je osigurano preko hladnog osnovnog materijala se pretvara u nepopušteni martenzit (UTM-unttempered martensite). On je krhak, sadrži zaostala naprezanja i u principu smanjuje zamornu čvrstoću, a pod mikroskopom se vidi kao bijeli sloj. Bijeli sloj je rezultat mikrostrukturnih promjena. Bijeli sloj ima visoku tvrdoću, često veću od osnovnog materijala. Iznos tvrdoće je 1000 HV_{0,025} što je za 20% veće od osnovnog materijala. Bijeli sloj se sastoji od 2/3 austenita. Osim zaostalog austenita u mikrostrukтури je i martenzit koji ima tetragonalnu kristalnu rešetku. Poslije obrade nema amorfnog sloja jer toplinska vodljivost obradnog materijala nije smanjena, pa se može zaključiti da bijeli sloj posjeduje kristalnu strukturu. Tip i sastav bijelog sloja jedino ovisi o transformaciji osnovnog materijala koje se odvija u određenim brzinama hlađenja.

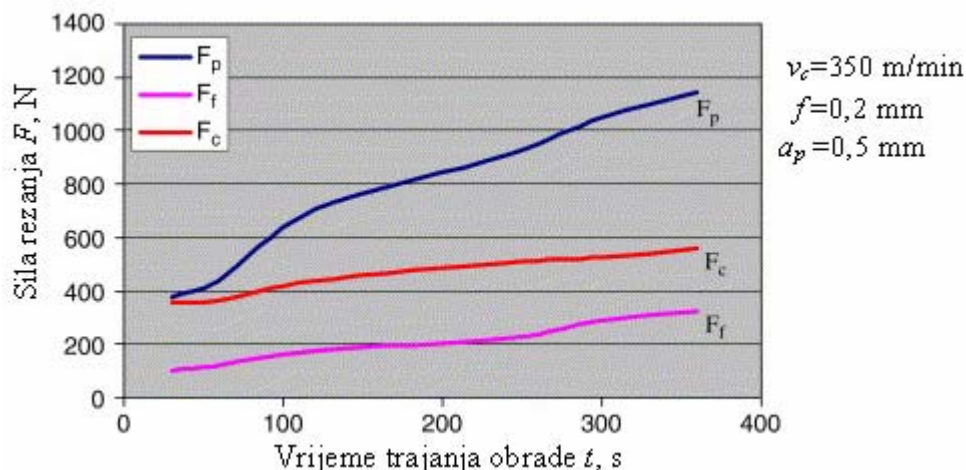
Da bi došlo do pojave bijelog sloja moraju biti ispunjena dva uvjeta :

- 1) Temperatura koja se postiže kao rezultat kontakta alata i obradka, mora dostići temp. Austenitizacije,
- 2) Hlađenje površinskog sloja mora biti kratko.

Nadalje temperatura uslijed procesa ovisi i o toplinskoj vodljivosti materijala alata i obradka. U istim uvjetima obrade oko 52% proizvedene topline tijekom procesa odvedeno je preko odvojene čestice ako se koriste CBN alati sa 90% udjela CBN. Ta vrijednost iznosi 41% pri korištenju alata sa 50% udjela CBN. Vrijednosti parametara obrade značajno utječu na razvoj temperature. Brzina rezanja i posmak imaju primarni i sekundarni utjecaj na temperaturu, dok dubina rezanja neznatno utječe. Sa povećanjem parametara obrade dolazi i do povećanja temperature, ali iznos topline smještene u podpovršinskom sloju opada [14].

4.1.4. Trošenje reznog alata

Prema mnogim istraživanjima, istrošenost reznog alata utječe na sile rezanja i obrnuto. Nakai ukazuje da kod obrade otvrdnutih alatnih čelika, trošenje alata povećava natražnu silu F_p . Istraživanja vezana za trošenje alata pokazuju da sile rezanja i površinska hrapavost imaju tendenciju rasta trošenjem alata pri tvrdom tokarenju alatnih čelika, slika 33.



Slika 33. Utjecaj trošenja alata na sile rezanja pri obradi CBN pločicom sa TiN prevlakom [1]

Ko i Kim izvještavaju da je veličina komponenata sile rezanja ovisna o povećanju trošenja alata. S druge strane, Konig je primijetio da velike vrijednosti reznih sila, skupa s visokim omjerom radijalne i tangencijalne sile može uzrokovati veliko savijanje alata. Bhattacharyya i Aspinwall pokazuju da je za CBN tvrdo tokarenje, omjer natražne F_p i glavne sile rezanja F_c veći od 1, što je različito nego kod konvencionalnog tokarenja [14].

Ko i Kim su pokazali da se površinska hrapavost malo pogoršava (povećava) s početkom trošenja alata. Nakon istrošenja stražnje površine od 0,05 mm, površinska se hrapavost ponovo poboljšava da bi se opet nakon određenog istrošenja pogoršavala [14].

Kramer je objasnio da dodir odvojene čestice s površinom alata uslijed povećane temperature rezanja rezultira slojem koji blokira difuziju, smanjujući brzinu transporta alatnog materijala tj. brzinu trošenja alata. Povećana temperatura na skošenom reznom vrhu alata dovodi do povećanog trošenja alata, tj. do loma alata [1]. Budući da je tvrdo tokarenje zamišljeno kao zamjena za brušenje u postupcima završne obrade, većina studija usmjerena je na obradu tvrdim tokarenjem. Chou i Barash izvještavaju da su CBN-L alati prikladniji za obradu tokarenjem otvrdnutih čelika. Ko i Kim ukazuju da u slučajevima isprekidanog rada

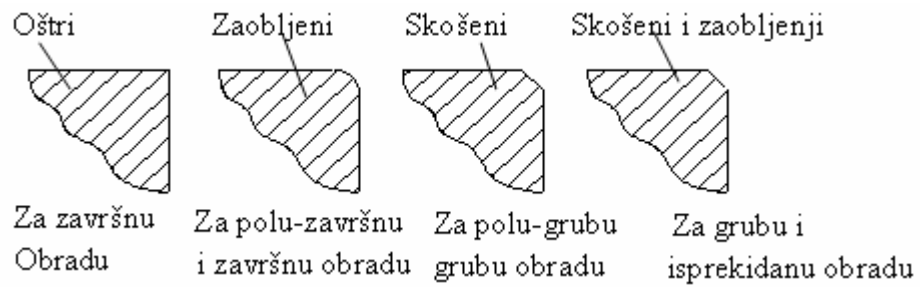
CBN-L alati pokazuju manju istrošenost i površinsku hrapavost i cjelokupno da su bolji od CBN-H alata. Nivo rezanja, npr. gruba, polu-završna ili završna obrada koje utječu na dubinu rezanja imaju veliki utjecaj na oblik odvojene čestice, vibracije alata, sile rezanja i trošenje alata. Pri isprekidanom tvrdom tokarenju čelika za ležaje, sadržaj CBN utjecajan je na trošenje alata i jednolikost površine. Ko i Kim demonstrirali su zanimljivu vezu između brzine rezanja i sadržaja CBN. Pokazali su da pri niskim brzinama rezanja, CBN-L (60% sadržaja CBN) je dominantan u odnosu na CBN-H (80% sadržaja CBN), dok je kod visokih brzina rezanja slučaj obrnut.

Utjecaj geometrije alata i prednjeg kuta proučavan je dosta često. Četiri tipa reznog brida oštri, skošeni, zaobljeni i skošeni plus zaobljeni su upotrebljavana za poboljšanje alatnih mogućnosti. Thiele izvještava da zaostala naprezanja proizvedena većim zaobljenjem oštrice su više tlačna nego naprezanja kod oštrice sa manjim zaobljenjem te ostavljaju "bijeće slojeve". Geometrija alata ima jako velik utjecaj na plastičnu deformaciju obradka. Hodgson i Trendler govore da veći negativni prednji kut (-15° do -20°) rezultira u povećanju istrošenosti rezne oštrice. Hodgson ukazuje da skošena rezna oštrica CBN alata smanjuje trajnost alata i povećava zarezno trošenje. Bossom tvrdi da kod tvrdog tokarenja negativni prednji kut (-6°) utječe tako da je manja posmična sila i manje trošenje u odnosu na pozitivni ili neutralni kut. Chou je testirao osnovna tri tipa rezne oštrice u završnoj obradi otvrdnutog čelika. Ispitivanje je pokazalo da zaobljene oštrice imaju lošije rezultate od preostale dvije na istrošenje alata kao i na kvalitetu površine [1].

4.1.5. Materijal i geometrija reznog alata

Tvrdo tokarenje sa keramičkim i CBN reznim alatima zahtjeva opreznu konstrukciju geometrije alata. CBN rezni alat ima manju žilavost u odnosu na druge uobičajene alatne materijale pa je stoga i lom vjerojatniji. Prema tome, potrebna je prikladna priprema rezne oštrice da bi se povećala čvrstoća rezne oštrice i dobile povoljne karakteristike površine na obrađenim obradcima. CBN rezni alat konstruiran je tako da ima negativni prednji kut i reznu oštricu (vrh) koja može bit skošena, oštra (ravna) ili zaobljena. Na slici 34 mogu se vidjeti mogući vrhovi za CBN rezne alate. Prema nedavnim studijama, očito je upotreba različito pripremljenih reznih oštrica nužna za grubu i završnu obradu materijala. THEIL je prezentirao rezultate eksperimentalnog istraživanja, utjecaja geometrije reznog alata i tvrdoće obratka na

zaostala naprezanja u završnom tvrdom tokarenju čelika. On tvrdi da velika zaobljenja alata proizvode više tlačnih naprezanja ali također ostavljaju bijele slojeve (“white-layers“) [1].



Slika 34. Tipovi vrhova reznog alata [1]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Polazeći od prethodnih analiza i spoznaja iz literature, provedeno je i eksperimentalno istraživanje u Laboratoriju za alatne strojeve, kako bi se vidjela obilježja procesa tvrdog tokarenja. U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno ispitati krutost naprave za prihvat mjerača sila na tokarskom obradnom centru SBL-500 i to uspoređujući eksperimentom dobivene vrijednosti sila i hrapavosti za dva slučaja. U prvom slučaju (Eksperiment 1), mjerač sila je postavljen vertikalno na revolversku glavu dok je u drugom slučaju (Eksperiment 2) isti mjerač sila postavljen na napravu za prihvat mjerača sila u horizontalni položaj (slika 40,41). Pri tome je karakterističnost procesa praćena mjerenjem slijedećih veličina :

- Komponente sila rezanja:

F_c , N - Glavna sila rezanja

F_p , N - Natražna sila rezanja

F_f , N - Posmična sila rezanja

- Hrapavosti obrađene površine :

R_a , μm - Srednje aritmetičko odstupanje

R_z , μm – Srednja visina neravnina

R_q , μm - Srednje kvadratno odstupanje profila

Eksperimentalni dio je proveden na visokolegirnom kromovom alatnom čeliku s približno 12% kroma koji je prethodno kaljen u ulju, te ima oznaku :

- X 210 Cr 12 po DIN-u 17006 ili oznake Č 4150 po HRN

Materijal obradka je visokokvalitetan alatni čelik, koji pored visoke tvrdoće ima i dobru žilavost. Upotrebljava se za visokoučinske rezne alate (matrice i žigove), alate za štancanje, obradu drva, noževe za strojne škare za tanke materijale, alate za valjanje navoja, duboko vučenje i istiskivanje, alate za prešanje u keramičkoj i farmaceutskoj industriji, valjke za hladno valjanje, mjerne alate, alate za preradu polimera, alate kompliciranog oblika itd. Udio pojedinih kemijskih elemenata u čeliku prikazan je tablicom 2.

Tablica 2. Kemijski sastav materijala obradka

OZNAKA	KEMIJSKI SASTAV, %					
X 210 Cr 12	C	Mn	Si	P	S	Cr
	1,96	0,28	0,31	0,0014	0,005	11,27

Čelik je prethodno toplinski obrađen postupkom kaljenja u laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Zagreb. Ispitni obradak, slika 35, šipkastog je oblika promjera 138 mm i duljine 300 mm. Tvrdoća obradka mjerena je uređajem Krautkramer (tip: MIC 10 DL, serijskog broja 34103-4347), te je dobivena prosječna tvrdoća obradka 60 HRC.



Slika 35. Ispitni obradak

5.1. Sredstva i uvjeti ispitivanja

Ispitivanje je provedeno u laboratoriju Katedre za alatne strojeve, a korišteni su:

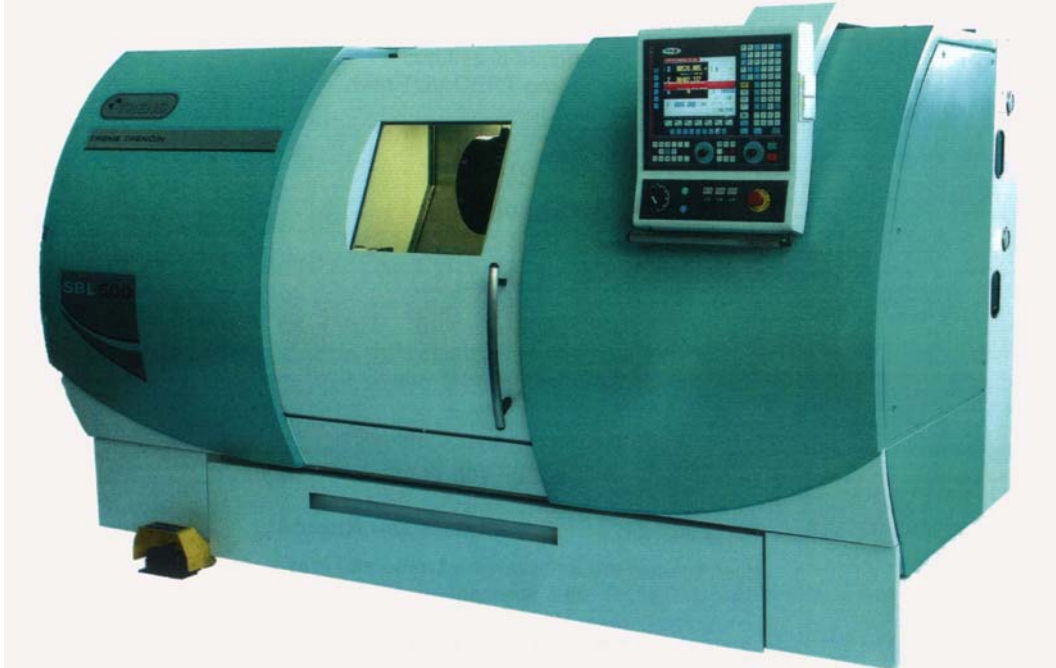
1. tokarski obradni centar SBL 500 proizvođača Trens Trenčin
2. trokomponentni uređaj za mjerenje sila, tipa 9257B, Kistler (Švicarska)
3. prijenosni uređaj za mjerenje površinske hrapavosti, Mitutoyo SJ-201

5.1.1. Karakteristike TOC-a

Osnovne karakteristike ovog tokarskog obradnog centra, slika 36 su slijedeće:

- dimenzije tokarenja :
 - max. promjer tokarenja – 405 mm
 - max. duljina tokarenja – 845 mm
- posmične osi:
 - X os – brzina - 1÷10 m/min
 - Z os – brzina - 1÷10 m/min
 - C os - za indeksiranje gl. vretena
- max. učestalost vrtnje glavnog vretena:- 4200 min⁻¹

- snaga glavnog vretena:- 18,5 kW
- max. učestalost vrtnje pogonjenih alata: - 3500 min⁻¹
- snaga pogonjenih alata: - 3 kW
- broj alata u revolverskoj glavi:- 12 alata (6 pogonjenih i 6 mirujućih)



Slika 36. Tokarski obradni centar SBL 500 proizvođača Trens Trenčín

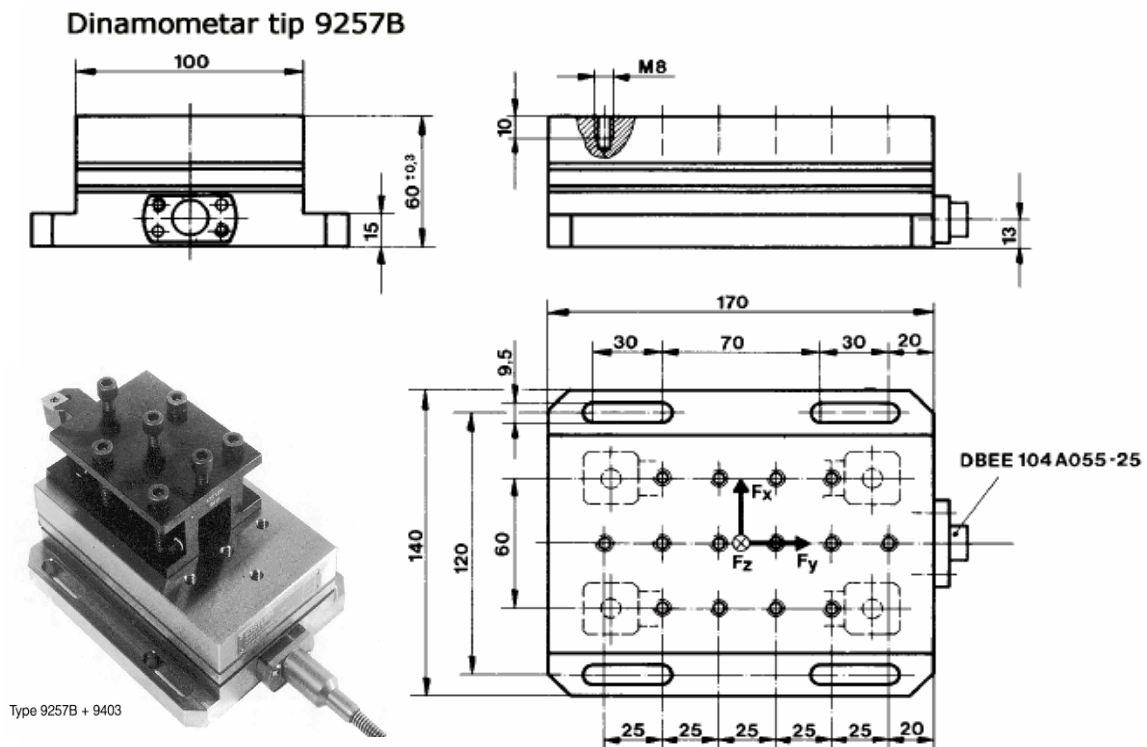
5.1.2. Mjerni instrument za mjerenje sila

Za mjerenje sile rezanja korišten je trokomponentni mjerac sila tipa 9257B, švicarskog proizvođača "KISTLER" (slika 37). Radi se o električnom mjeracu s piezoelektričnim pretvornikom, a osnovne karakteristike samog uređaja su prema [19] sljedeće:

- područje mjerenja sila: ± 5 kN
- preopterećenje: ± 7.5 kN; $-7.5/15$ kN za F_z
- krutost: $c_x, c_y > 1$ kN/ μm ; $c_z > 2$ kN/ μm
- temperaturno područje rada: 0 °C – 70 °C
- težina: 7.3 kg

Dinamometar se sastoji od četiri senzora za mjerenje tri komponente sile rezanja, a smješteni su između osnovne ploče i gornje ploče. Svaki senzor sadrži tri para kremenih ploča, jednu osjetljivu na pritisak u smjeru osi z , a druge dvije odgovaraju na smik u smjeru x i y osi. Izlazi iz četiri ugrađena senzora sila su povezana izvan dinamometra u smjeru koji dopušta

više-komponentna mjerna oprema. Držač alata koji se montira na mjerni uređaj može prihvatiti alat s maksimalnim dimenzijama drške 26×26 mm.



Slika 37. Uređaj za mjerenje sila rezanja [19]

5.1.3. Mjerni instrument za mjerenje površinske hrapavosti

Za mjerenje parametara hrapavosti obrađene površine korišten je mjerni uređaj Mitutoyo SP-201 (slika 38). Rezultati mjerenja vidljivi su na displeju uređaja i ne tiskaju se na papiru, a karakteristike mjernog uređaja su prema [20] sljedeće:

- Mjerni profili: R, P, DIN 4776
- Filter: 2CR-75%, PC-75%, PC 50%
- Prikaz veličina: Ra, Ry, Rz, Rq, Sm, S, Pc, R3z, mr, Rt, Rp, Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2, A1, A2, Vo
- Snaga: 1,5 W
- Standardna duljina mjerenja: 0-12.5mm
- Standardni put ticala: 0.25, 0.8, 2.5mm
- Dimenzije mjernog uređaja: 156.5 x 62 x 52mm
- Dimenzije ticala: 115 x 23 x 26mm

- Težina mjernog uređaja: 0.3kg
- Težina ticala: 0.2 kg



Slika 38. Mjerni uređaj u poziciji za mjerenje

5.2. Odabir materijala reznog alata i parametara obrade

Izbor ulaznih parametara procesa provodi se na osnovi spoznaja koje smo prethodno analizirali u radu i preporučenim parametrima uzetim iz kataloga raznih proizvođača (Iscar, Secotools). Iz prethodnog teorijskog razmatranja može se vidjeti da najznačajniji utjecaj na izlazne parametre ima:

- Brzina rezanja v_c , m/min
- Posmak f , mm
- Dubina rezanja a_p , mm
- Trajanje obrade t

Proizvođač reznih pločica Iscar, za obradu otvrdnutih materijala, odnosno materijala povišene tvrdoće nudi rezne pločice od keremike i CBN , tablica 3.

Tablica 3. Rezne pločice za tokarenje otvrdnutih materijala [21]

Materijal obradka	Tvrdoća HRC	Rezna keramika			CBN	
		v_c , m/min			v_c , m/min	
		IN 22	IN 23	ISB	IB 50/55	IC 907
Otvrdnuti čelik	55	50-150	40-120		80-140	80-140
Otvrdnuti čelik	60	50-120	40-100		80-120	60-120
Tvrđi lijev	-	30-200				70-150
Sivi lijev	55		80-120	60-100		100-140

Za istraživanje karakteristika procesa tvrdog tokarenja, izabrane su keramičke pločice, slika 39, oznake :

- CNGA 120408 TIN 22
- CNGA 120404 TIN 23

Razlog odabira keramičke pločice bio je prvenstveno cijena. Cijena jedne pločice (sa četiri rezne oštrice) je približno 100 kuna, dok pločica od CBN, koja posjeduje znatno bolja svojstva u odnosu na reznu keramiku ima cijenu približno 850 kuna. Polumjer vrha rezne pločice CNGA 120408 TIN 22 je $r_\epsilon=0.8$ mm, a kod pločice oznake CNGA 120404 TIN 23 je $r_\epsilon=0.4$ mm.



Slika 39. Keramičke rezne pločice

Proizvođač Iscar [21], za odabranu reznu pločicu od keramike preporuča parametre obrade prikazane tablicom 4.

Tablica 4. Preporučeni parametri obrade za reznu keramiku [21]

Materijal obradka	Brzina rezanja v_c , m/min	Posmak f , mm	Dubina rezanja a_p , mm	Tip obrade
Otvrdnuti čelik >50 HRC	50 – 150	0,05 – 0,012	0,2 – 1,5	Bez hlađenja
Brzorezni čelik	30 – 200	0,05 – 0,20	0,2 – 1,5	Bez hlađenja
Tvrđi lijev	30 – 200	0,05 – 0,20	0,2 – 1,5	Bez hlađenja
Alatni čelik	100 - 300	0,05 – 0,30	1,0 – 3,0	Bez hlađenja

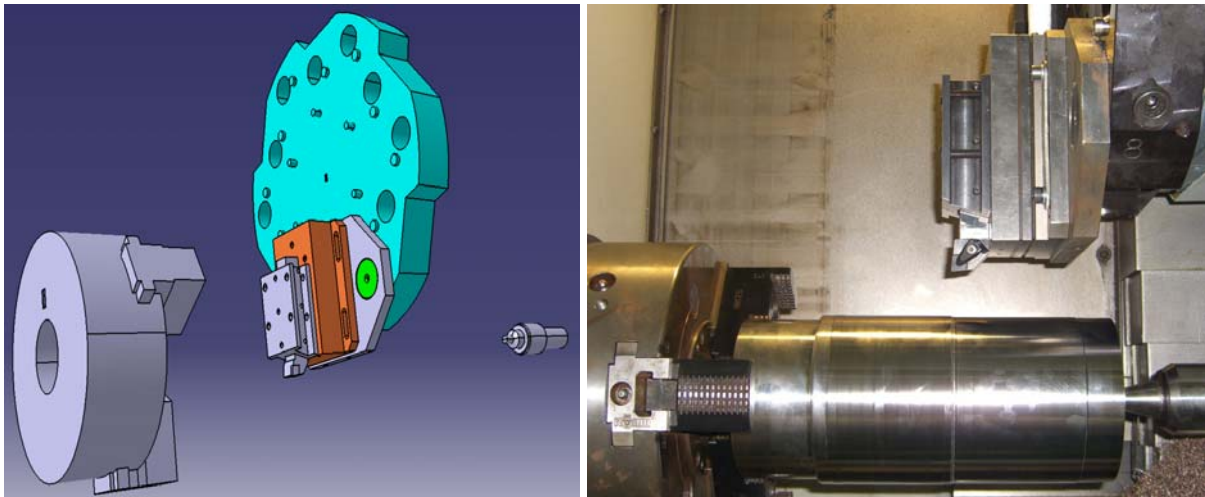
5.3. Rezultati mjerenja

Ispitivanje sila rezanja i površinske hrapavosti provedeno je uz promjenu slijedećih ulaznih parametara obrade:

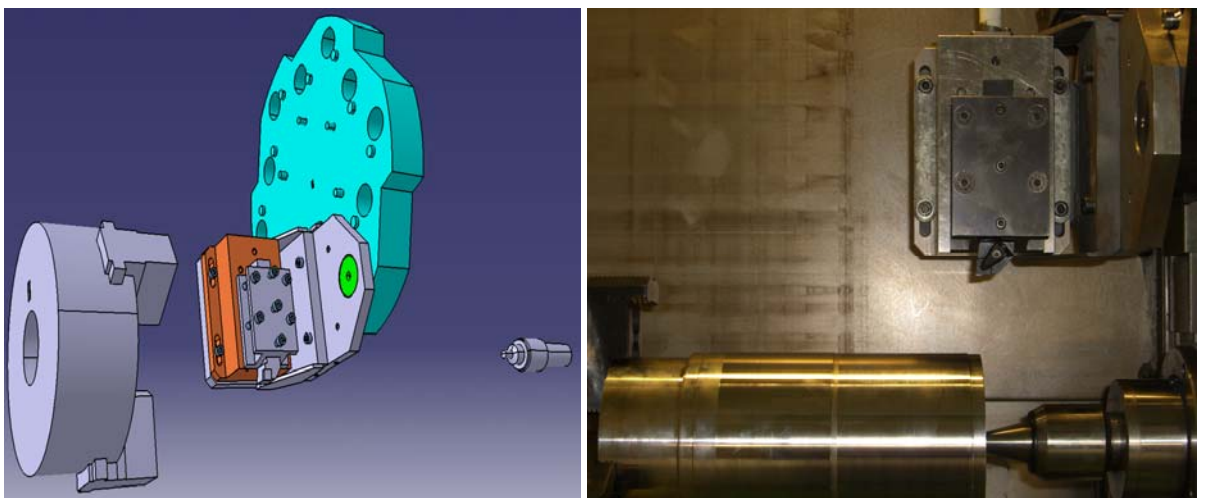
- posmak $f = 0,06 - 0,12$ mm
- brzina rezanja $v_c = 80 - 140$ m/min
- dubinu rezanja $a_p = 0,05 - 0,8$ mm

Uspoređivana su dva slučaja:

- Eksperiment 1.- naprava s vertikalno stegnutim uređajem za mjerenje sila, slika 40.
- Eksperiment 2.- naprava s horizontalno stegnutim uređajem za mjerenje sila, slika 41.

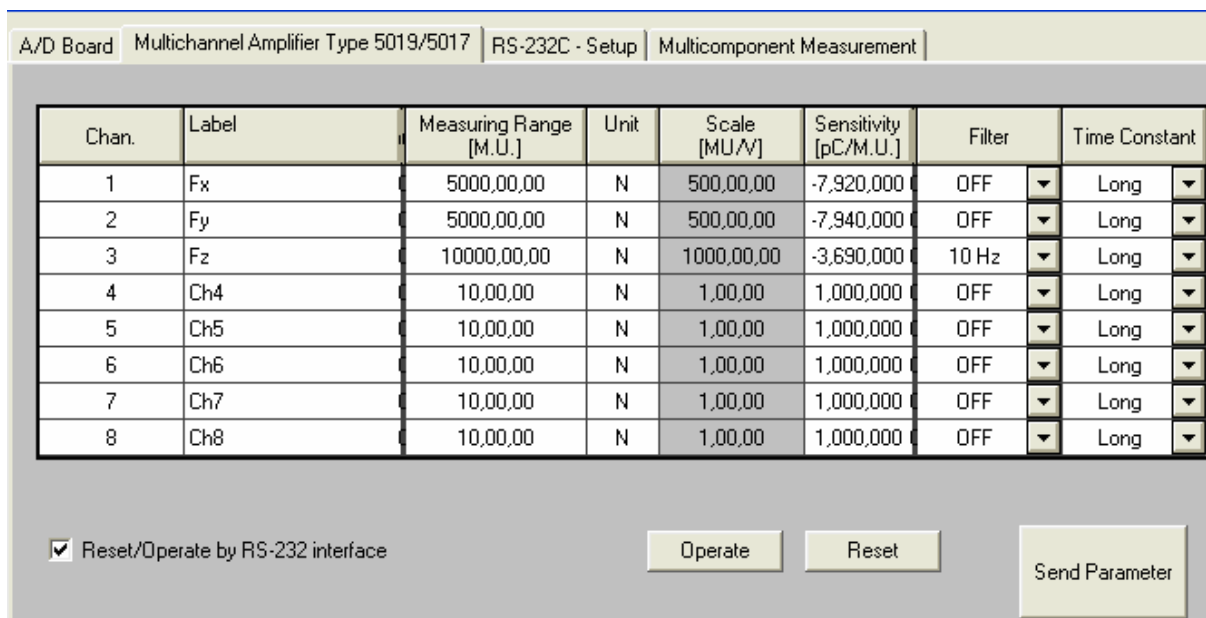


Slika 40. Naprava s vertikalno stegnutim uređajem za mjerenje sila



Slika 41. Naprava s horizontalno stegnutim uređajem za mjerenje sila

Uređaj kojim su mjerene sile rezanja bio je podešen tako da su snimane sile u vremenskom intervalu od 20 sekundi, te su parametri bili podešeni kao na slici 42. Kod mjerenja hrapavosti, za svaku obrađenu površinu napravljena su po tri mjerenja i to na način da je obradak zakrenut pri svakom mjerenju za približno 120° , a u tablicama je prikazana srednja vrijednost tih mjerenja.



Slika 42. Parametri uređaja za mjerenje sila

5.3.1. Rezultati mjerenja komponenti sila rezanja pri obradi reznom pločicom CNGA 120408 TIN 22

5.3.1.1. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku

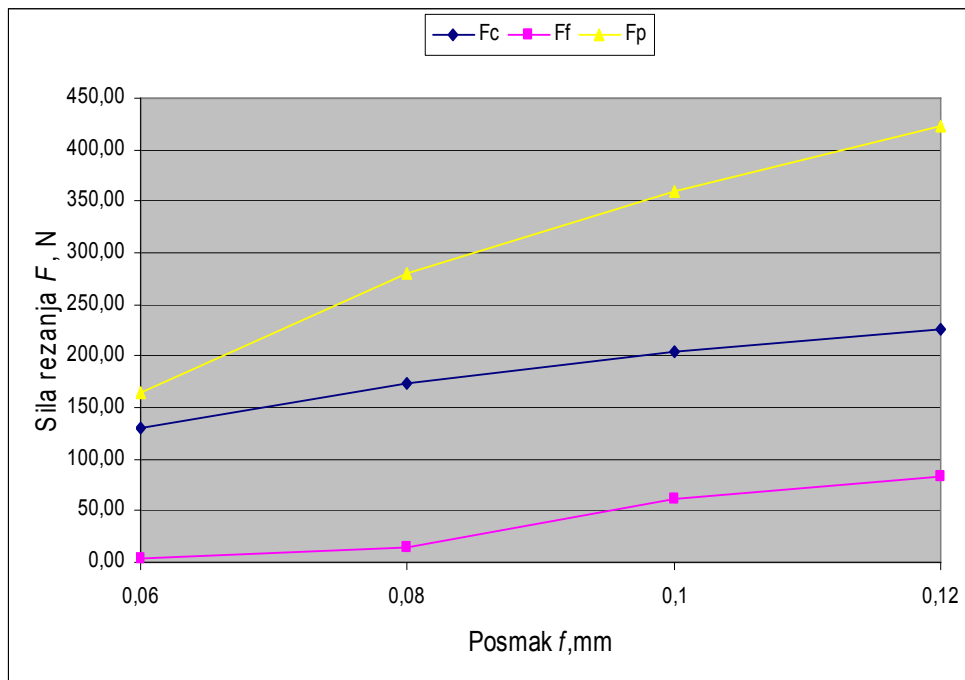
Ispitivanje kod kojeg je provedeno mjerenje sila rezanja u ovisnosti o posmaku vršeno je tako da su mijenjane vrijednosti posmaka dok su ostali parametri obrade, brzina rezanja i dubina rezanja imali konstantne vrijednosti. Dobiveni rezultati za eksperiment 1 i eksperiment 2 su prikazani u tablici 5 i 6, odnosno dijagramski na slikama 43 i 44.

Tablica 5. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku - Eksperiment 1

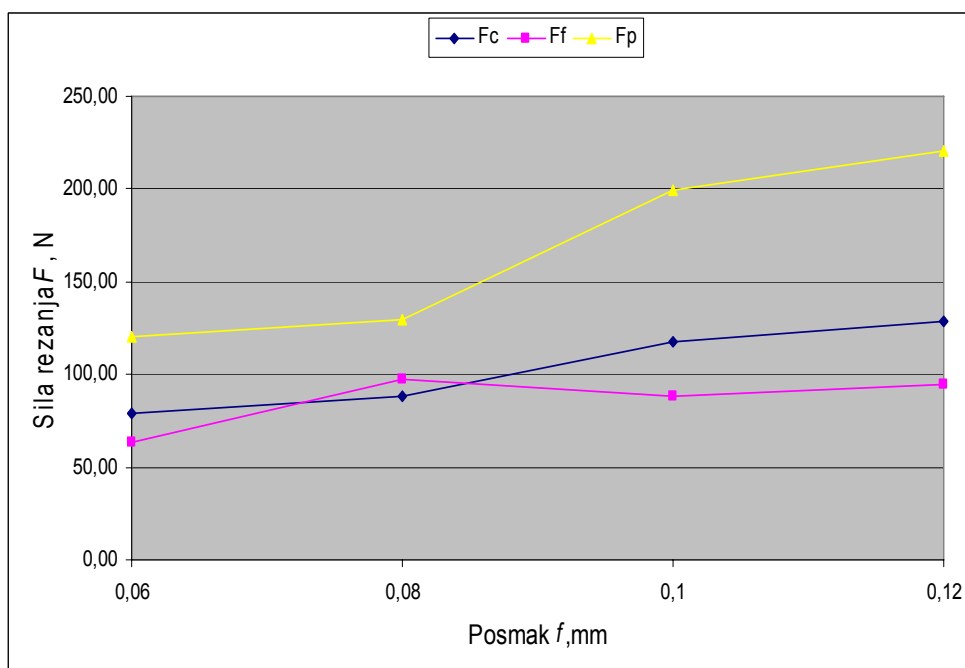
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_t , N	F_p , N	F_c , N
1	100	0,3	0,06	2,86	164,52	129,37
2	100	0,3	0,08	14,76	279,89	172,85
3	100	0,3	0,1	62,24	359,67	204,45
4	100	0,3	0,12	83,99	422,64	225,96

Tablica 6. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku - Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	100	0,3	0,06	63,33	120,74	78,77
2	100	0,3	0,08	97,42	129,74	88,46
3	100	0,3	0,1	88,54	199,21	117,80
4	100	0,3	0,12	94,74	220,94	128,74

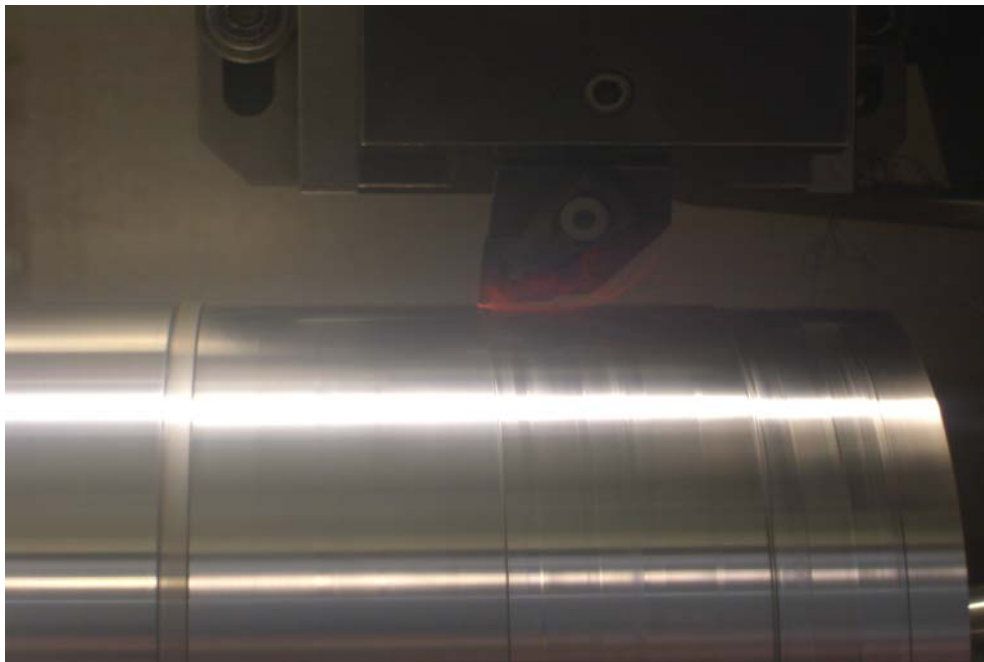


Slika 43. Sile rezanja u ovisnosti o posmaku za eksperiment 1



Slika 44. Sile rezanja u ovisnosti o posmaku za eksperiment 2

Iz slike 43 i 44 je vidljivo da se povećanjem vrijednosti posmaka povećavaju i sile rezanja, te je također vidljivo da posmak podjednako utječe na sve tri komponente sile rezanja. Najveća sila rezanja prilikom mjerenja je natražna sila F_p , a najmanja posmična sila F_f . Pri najmanjoj vrijednosti posmaka od 0,06 mm oblik odvojene čestice je segmentiranog oblika (slika 45). Uzrok takvom segmentiranom obliku odvojene čestice je mali posmak, te relativno mala dubina rezanja.



Slika 45. Segmentirani oblik odvojene čestice pri režimima obrade
 $v_c = 100 \text{ m/min}$, $f = 0,06 \text{ mm}$, $a_p = 0,3 \text{ mm}$

5.3.1.2. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja

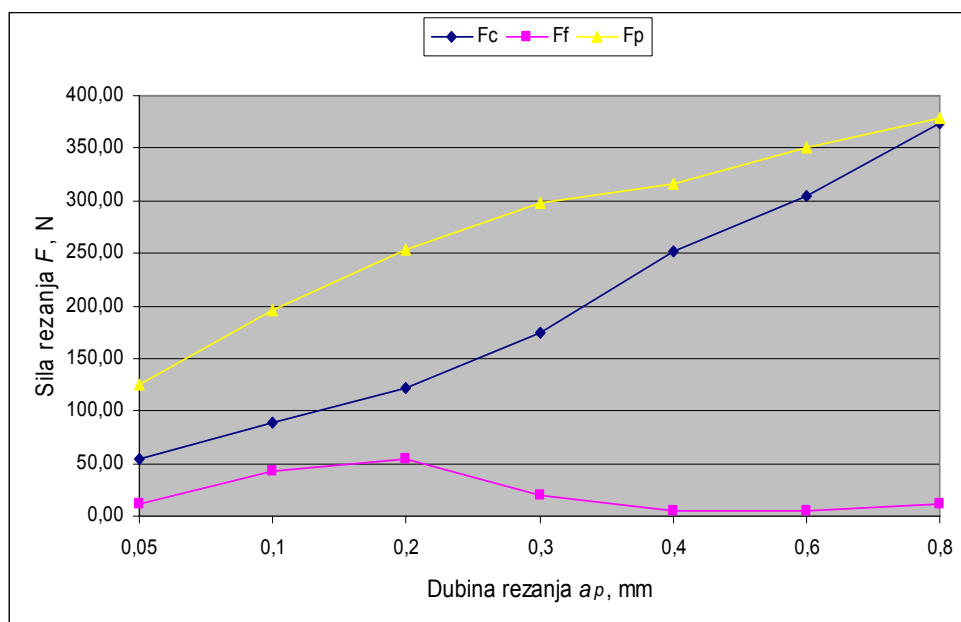
Kod mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja, eksperiment je izveden tako da su mijenjane vrijednosti dubine rezanja, dok su brzina rezanja i posmak imali konstantne vrijednosti. Dobiveni rezultati prikazani su tablici 7 i 8, te dijagramski na slikama 46 i 47.

Tablica 7. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 1

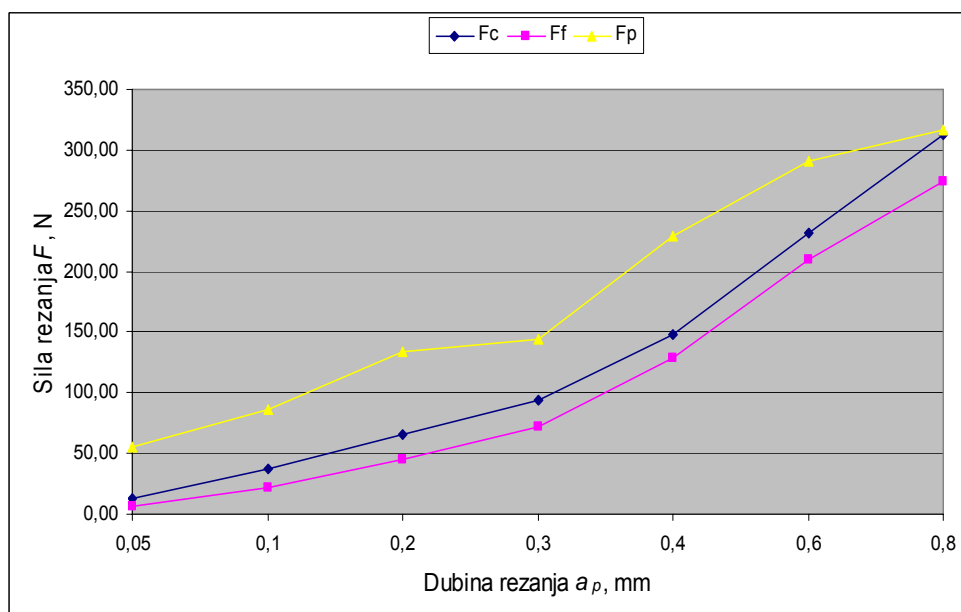
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	100	0,05	0,08	11,27	124,66	54,83
2	100	0,1	0,08	43,28	196,70	88,72
3	100	0,2	0,08	53,64	253,76	122,32
4	100	0,3	0,08	19,23	297,92	174,88
5	100	0,4	0,08	4,24	315,56	251,36
6	100	0,6	0,08	4,82	350,88	304,13
7	100	0,8	0,08	11,56	377,98	372,93

Tablica 8. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	100	0,05	0,08	7,05	55,31	13,08
2	100	0,1	0,08	21,91	85,86	37,27
3	100	0,2	0,08	45,59	133,64	65,22
4	100	0,3	0,08	71,55	144,44	94,38
5	100	0,4	0,08	128,55	229,59	148,54
6	100	0,6	0,08	210,04	290,45	231,99
7	100	0,8	0,08	274,15	316,60	313,02



Slika 46. Sile rezanja u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 1



Slika 47. Sile rezanja u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 2

Iz slike 46 i 47 se uočava porast svih komponenti sila rezanja s porastom dubine rezanja, te je vidljivo da u eksperimentu 2 sile rezanja slijede gotovo linearni porast što je u skladu s teorijom. Oblik odvojene čestice pri svim dubinama rezanja je kontinuiranog oblika što prikazuje i slika 48.



Slika 48. Kontinuirani oblik odvojene čestice pri režimima obrade

$$v_c = 100 \text{ m/min}, \quad a_p = 0,8 \text{ mm}, \quad f = 0,08 \text{ mm}$$

5.3.1.3. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja

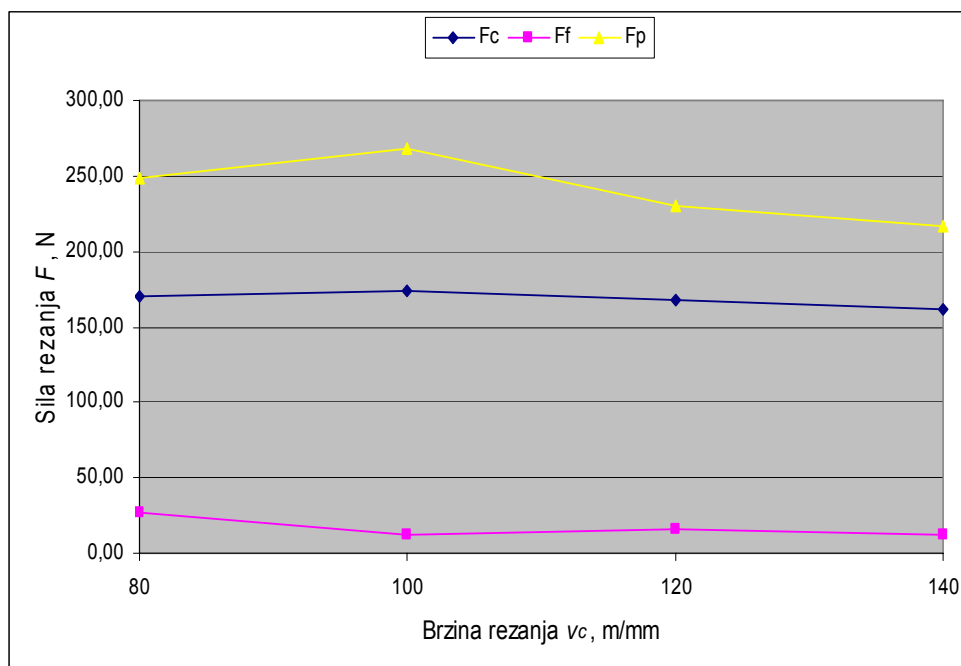
Kod mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja, eksperiment je izveden tako da su mijenjane vrijednosti brzine rezanja, dok su dubina rezanja i posmak imali konstantne vrijednosti. Dobiveni rezultati prikazani su tablici 9 i 10, te dijagramski na slikama 49. i 50.

Tablica 9. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 1

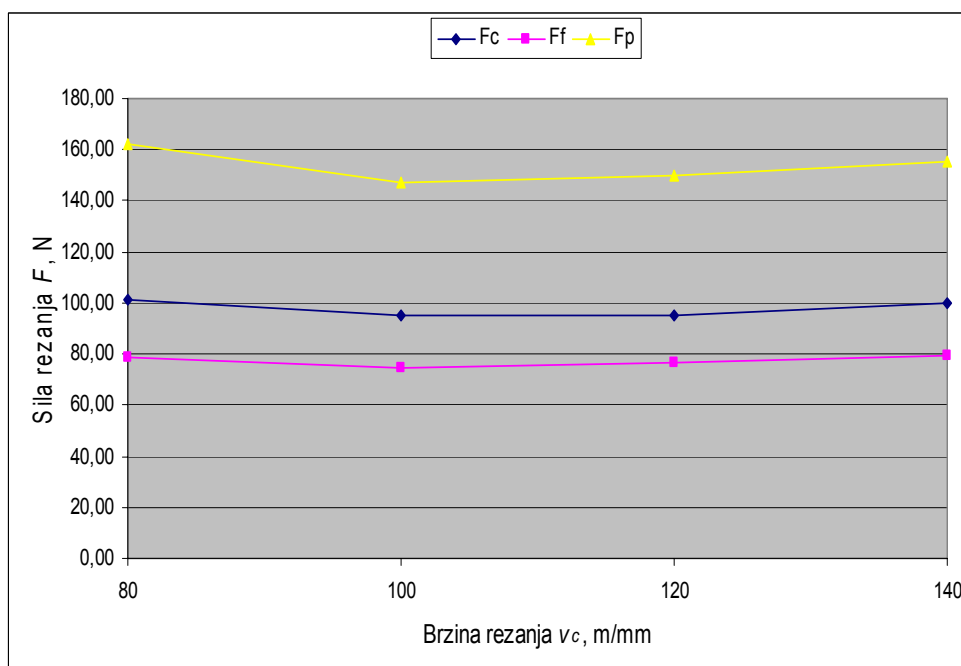
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	80	0,3	0,08	26,60	248,96	170,73
2	100	0,3	0,08	12,24	268,11	173,68
3	120	0,3	0,08	15,73	230,34	168,14
4	140	0,3	0,08	12,42	216,73	161,21

Tablica 10. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f_z , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	80	0,3	0,08	78,91	162,09	101,28
2	100	0,3	0,08	74,32	147,46	95,31
3	120	0,3	0,08	76,49	150,01	95,04
4	140	0,3	0,08	79,37	155,56	99,95

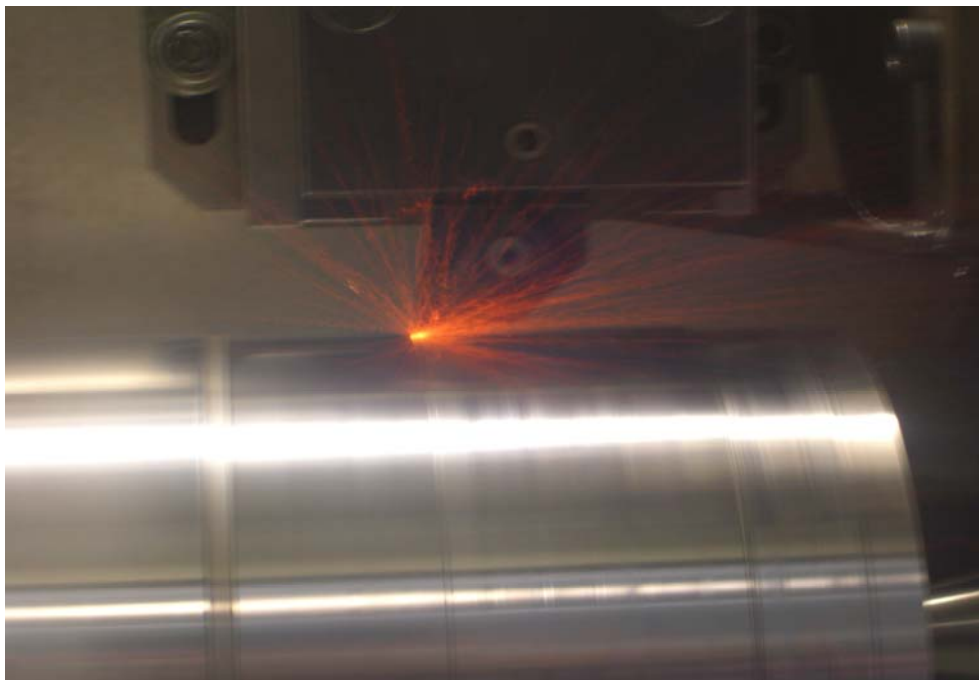


Slika 49. Sile rezanja u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 1



Slika 50. Sile rezanja u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 2

Iz slike 49 i 50 se može zaključiti da brzina rezanja u ispitivanom području 80 – 140 m/min nema značajnih utjecaja na promjenu vrijednosti sila rezanja. Oblik odvojene čestice pri brzinama rezanja 80 – 120 m/min je kontinuiranog oblika, dok je pri brzini rezanja od 140 m/min lomljenog oblika što prikazuje i slika 51.



Slika 51. Lomljeni oblik odvojene čestice pri režimima obrade
 $v_c = 100 \text{ m/min}$, $a_p = 0,8 \text{ mm}$, $f = 0,08 \text{ mm}$

5.3.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti obradka pri obradi reznom pločicom CNGA 120408 TIN 22

5.3.2.1. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku

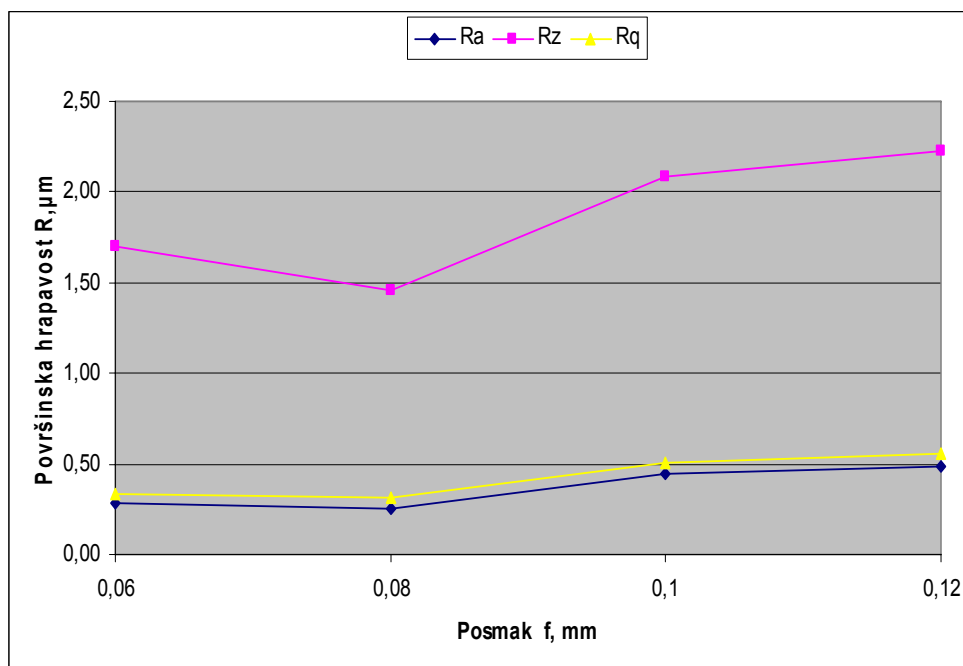
Srednje vrijednosti rezultata mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku prikazane su tablicom 11 i 12, te dijagramski slikom 52 i 53.

Tablica 11. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 1

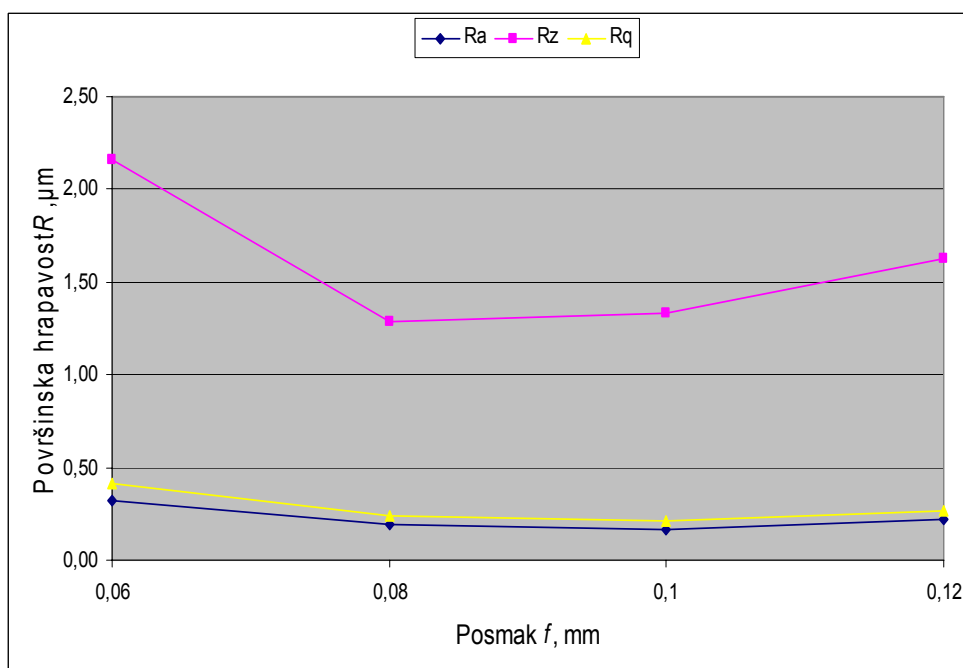
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,3	0,06	0,28	1,70	0,33
2	100	0,3	0,08	0,25	1,46	0,31
3	100	0,3	0,1	0,45	2,09	0,51
4	100	0,3	0,12	0,49	2,23	0,56

Tablica 12. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f_s , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,3	0,06	0,32	2,16	0,41
2	100	0,3	0,08	0,19	1,29	0,24
3	100	0,3	0,1	0,17	1,33	0,21
4	100	0,3	0,12	0,22	1,63	0,27



Slika 52. Ovisnost površinske hrapavosti o posmaku za eksperiment 1



Slika 53. Ovisnost površinske hrapavosti o posmaku za eksperiment 2

Iz slike 52 vidljivo je da s povećanjem vrijednosti posmaka dolazi do povećanja površinske hrapavosti obradka, što je sukladno s teorijom. Iz slike 53 je vidljivo da pri posmaku 0,06 mm površinska hrapavost ima najveću vrijednost, što je posljedica pojave vibracija i omatanja kontinuirane odvojene čestice oko noža, (slika 54), dok za ostale vrijednosti s povećanjem posmaka povećava se i površinska hrapavost.



Slika 54. Omatanje kontinuirane odvojene čestice oko noža pri režimima obrade

$$v_c = 100 \text{ m/min}, a_p = 0,3 \text{ mm}, f = 0,06 \text{ mm}$$

5.3.2.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja

Srednje vrijednosti rezultata mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja prikazane su tablicom 13 i 14, te dijagramski slikom 55. i 56.

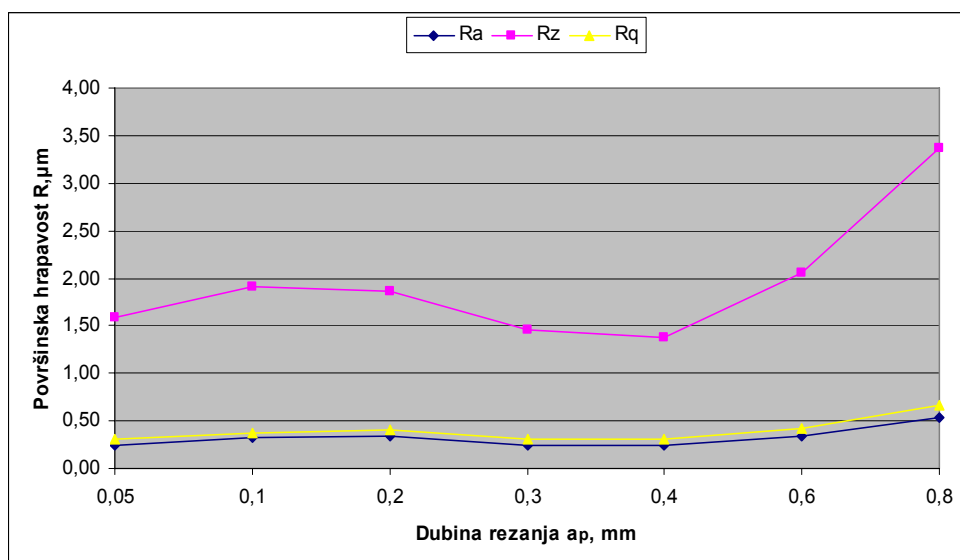
Tablica 13. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 1

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,05	0,08	0,25	1,59	0,30
2	100	0,1	0,08	0,32	1,91	0,38
3	100	0,2	0,08	0,34	1,86	0,40
4	100	0,3	0,08	0,25	1,46	0,31
5	100	0,4	0,08	0,25	1,37	0,30
6	100	0,6	0,08	0,34	2,05	0,42
7	100	0,8	0,08	0,54	3,37	0,66

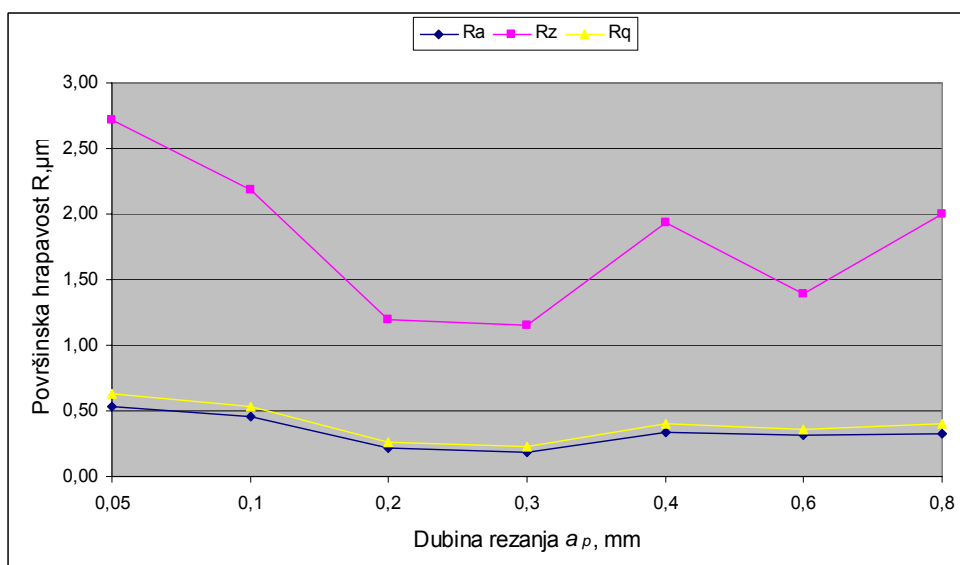
Tablica 14. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja –

Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f_s , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,05	0,08	0,53	2,72	0,63
2	100	0,1	0,08	0,46	2,19	0,53
3	100	0,2	0,08	0,22	1,20	0,26
4	100	0,3	0,08	0,18	1,15	0,23
5	100	0,4	0,08	0,34	1,93	0,40
6	100	0,6	0,08	0,31	1,39	0,36
7	100	0,8	0,08	0,33	2,00	0,40



Slika 55. Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja za eksperiment 1



Slika 56. Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja za eksperiment 2

Iz slike 55 i 56 je vidljivo da promjena dubine rezanja neznatno utječe na površinsku hrapavost, što je u suprotnosti s očekivanjem jer kod konvencionalnog tokarenja s povećanjem dubine rezanja povećava se i površinska hrapavost. U eksperimentu 1 pri dubini rezanja 0,8 mm i eksperimentu 2 pri dubini rezanja 0,05 mm je došlo do vibracija pa je zato površinska hrapavost malo veća nego pri ostalim dubinama rezanja.

5.3.2.3. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja

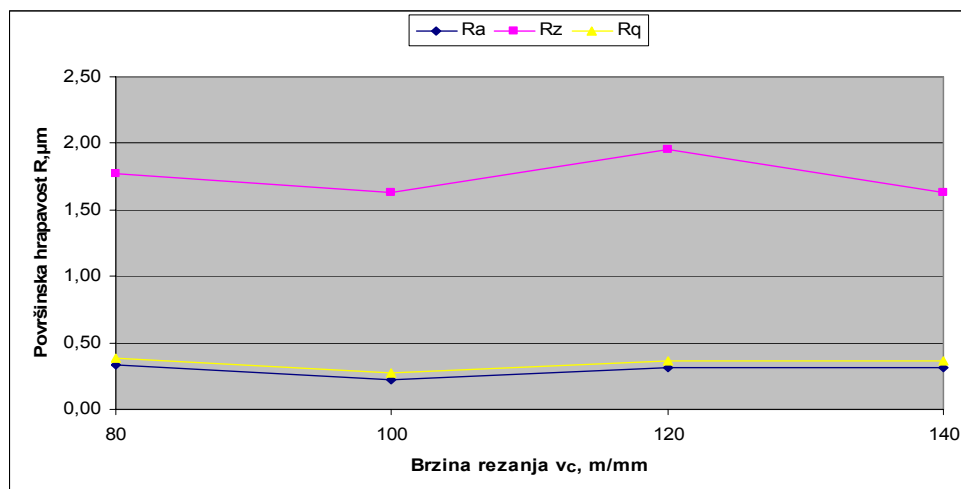
Srednje vrijednosti rezultata mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja prikazane su tablicom 15 i 16, te dijagramski slikom 57 i 58.

Tablica 15. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja –
Eksperiment 1

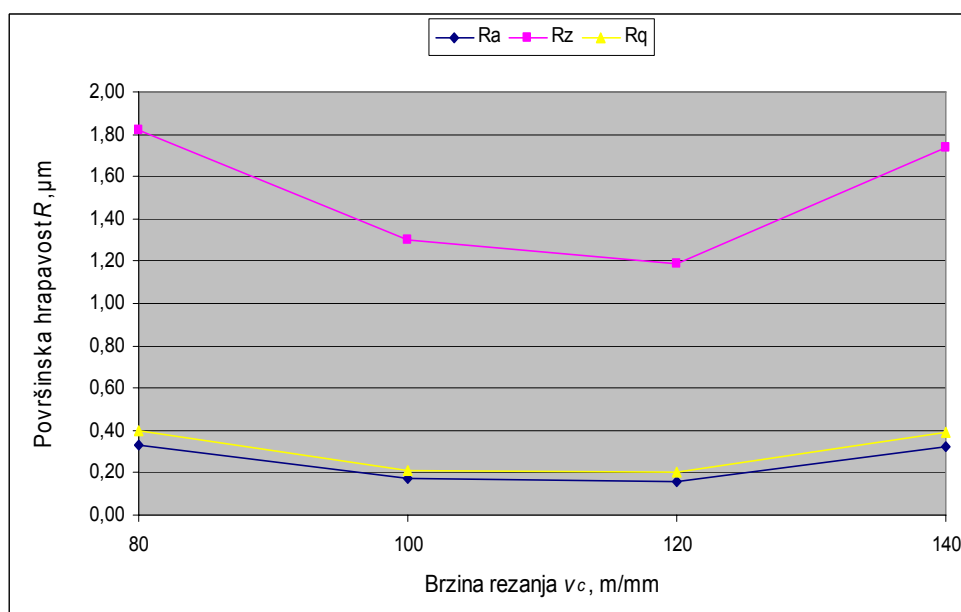
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	80	0,3	0,08	0,33	1,77	0,38
2	100	0,3	0,08	0,22	1,63	0,27
3	120	0,3	0,08	0,31	1,95	0,36
4	140	0,3	0,08	0,31	1,63	0,36

Tablica 16. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja –
Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	80	0,3	0,08	0,33	1,82	0,40
2	100	0,3	0,08	0,17	1,30	0,21
3	120	0,3	0,08	0,16	1,19	0,20
4	140	0,3	0,08	0,32	1,74	0,39



Slika 57. Ovisnost površinske hrapavosti o brzini rezanja za eksperiment 1



Slika 58. Ovisnost površinske hrapavosti o brzini rezanja za eksperiment 2

Iz slike 57 i 58. je vidljivo da su najveće vrijednosti površinske hrapavosti postignute pri najmanjoj vrijednosti brzine rezanja od 80 m/min. Gledajući raspon brzina rezanja 80-120 m/min, uočava se minimum pri 100 m/min, što je u suprotnosti klasičnom tokarenju gdje se povećanjem brzine rezanja smanjuje vrijednost površinske hrapavosti. Površinska hrapavost prilikom mijenjanja brzina rezanja je varirala tj. bila je nepredvidiva. Iz navedenog se može zaključiti da kod tvrdog tokarenja postoji određeni raspon brzina za dobivanje optimalne površinske hrapavosti.

5.3.3. Rezultati mjerenja komponenti sila rezanja pri obradi reznom pločicom CNGA 120404 TIN 23

5.3.3.1. Rezultat mjerenja sila rezanja o posmaku

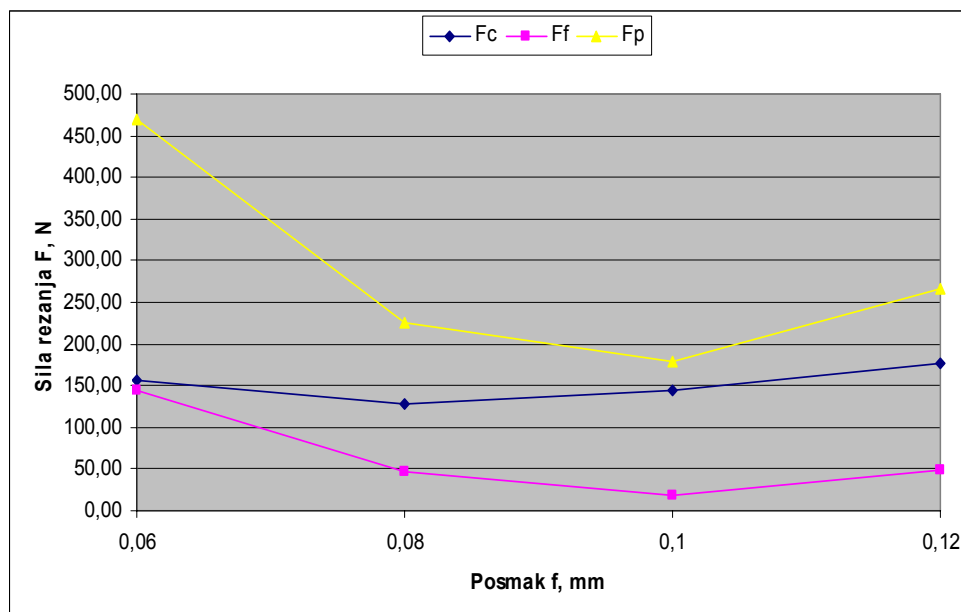
Ispitivanje kod kojeg je provedeno mjerenje sila rezanja u ovisnosti o posmaku vršeno je tako da su mijenjane vrijednosti posmaka dok su ostali parametri obrade, brzina rezanja i dubina rezanja imali konstantne vrijednosti. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 17 i 18, odnosno dijagramski na slikama 59 i 60.

Tablica 17. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 1

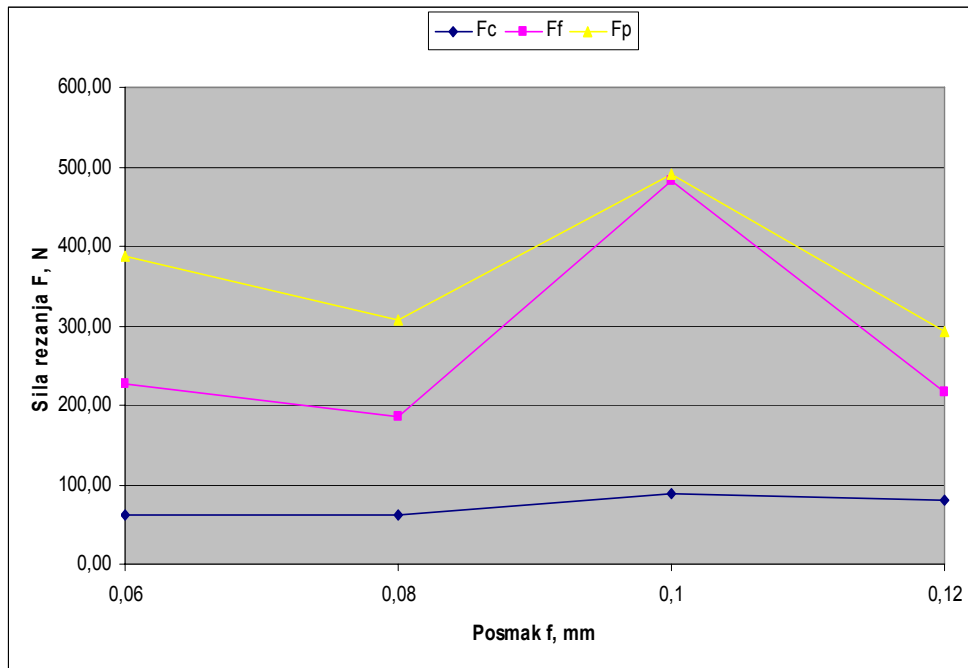
	v_c , m/min	a_{p2} , mm	f_s , mm	F_{f2} , N	F_{p2} , N	F_{c2} , N
1	100	0,3	0,06	145,15	469,21	156,52
2	100	0,3	0,08	47,69	225,64	128,22
3	100	0,3	0,1	18,72	178,70	144,93
4	100	0,3	0,12	48,84	266,41	175,96

Tablica 18. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_{p2} , mm	f_s , mm	F_{f2} , N	F_{p2} , N	F_{c2} , N
1	100	0,3	0,06	226,04	387,90	60,86
2	100	0,3	0,08	185,38	306,37	61,00
3	100	0,3	0,1	483,13	491,35	88,46
4	100	0,3	0,12	215,52	292,70	80,23

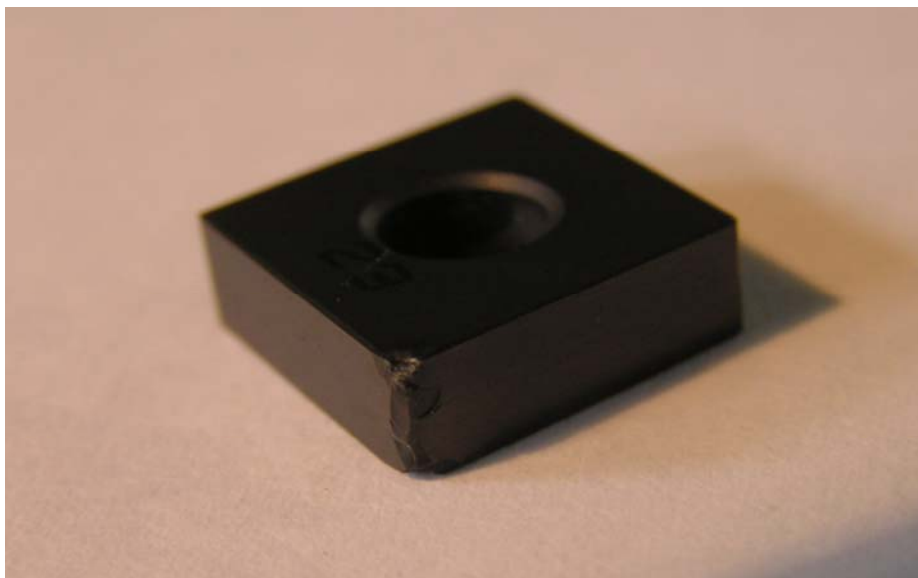


Slika 59. Sile rezanja u ovisnosti o posmaku za eksperiment 1



Slika 60. Sile rezanja u ovisnosti o posmaku za eksperiment 2

Iz slika 59 i 60 je vidljivo da u eksperimentu 1 pri posmaku 0,06 mm i 0,08 mm, te u eksperimentu 2 pri posmaku 0,06 mm i 0,1 mm sile rezanja imaju veće vrijednosti nego pri ostalim vrijednostima posmaka, što se može pripisati lošoj kvaliteti rezne pločice alata (može se pretpostaviti da je glavni razlog brzog trošenja rezne pločice što se eksperiment obavljao pri brzini rezanja 100 m/min, koja je kritična zato jer parametri zadani od proizvođača reznih pločica tvrde da ja max. brzina rezanja za ovu kvalitetu rezne pločice 100 m/min), gdje je prilikom obrade došlo do istrošenja vrha alata i njegovog pucanja, slika 61.



Slika 61. Istrošenje vrha alata

5.3.3.2. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja

Ispitivanje kod kojeg je provedeno mjerenje sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja vršeno je tako da su mijenjane vrijednosti dubine rezanja dok su ostali parametri obrade, brzina rezanja i posmak imali konstantne vrijednosti. Dobiveni rezultati su prikazani u tablici 19 i 20, odnosno dijagramski na slikama 62. i 63.

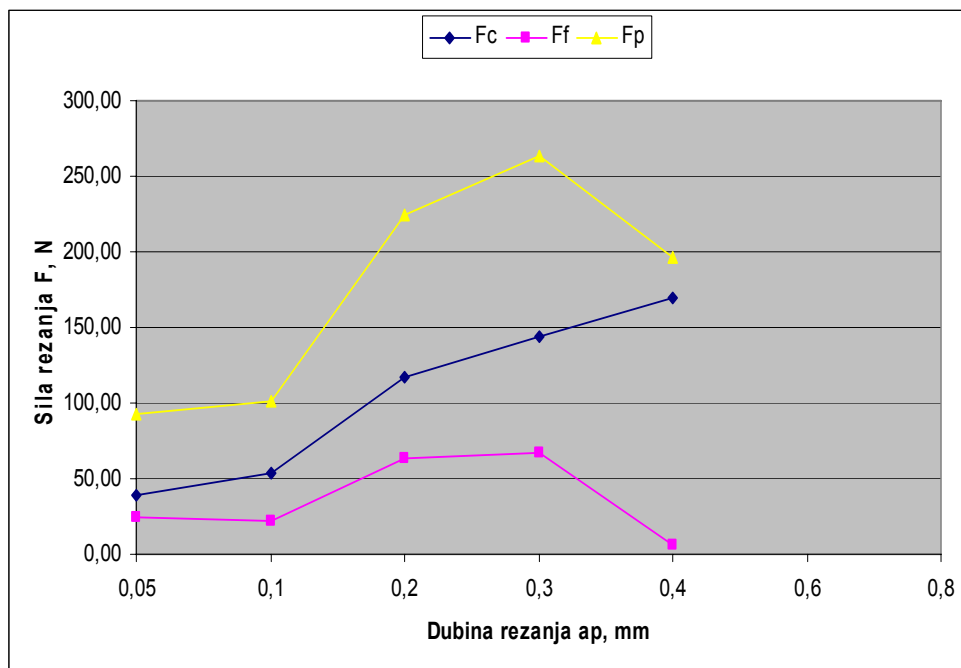
Tablica 19. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 1

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	100	0,05	0,08	24,79	92,76	38,53
2	100	0,1	0,08	22,01	101,33	53,81
3	100	0,2	0,08	63,95	224,59	117,49
4	100	0,3	0,08	66,96	262,97	144,34
5	100	0,4	0,08	5,60	196,08	169,63
6	100	0,6	0,08	-	-	-
7	100	0,8	0,08	-	-	-

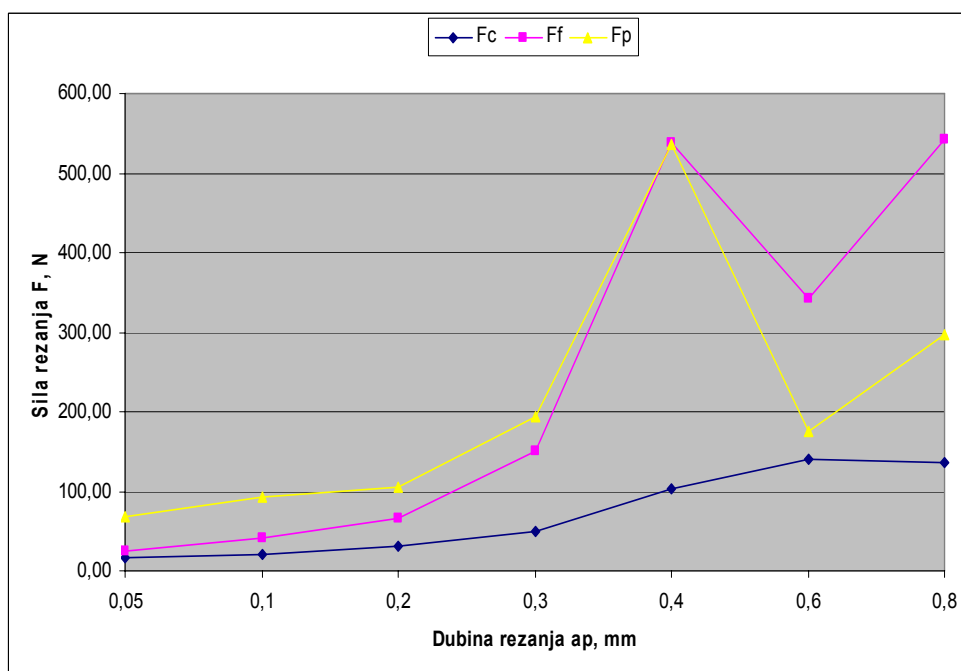
Tablica 20. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	100	0,05	0,08	24,94	69,05	15,60
2	100	0,1	0,08	40,22	93,33	21,51
3	100	0,2	0,08	66,86	104,56	30,81
4	100	0,3	0,08	150,11	194,39	49,37
5	100	0,4	0,08	537,93	535,43	102,75
6	100	0,6	0,08	341,89	175,87	141,01
7	100	0,8	0,08	541,59	297,45	135,18

Za eksperiment 1 prikazan u tablici 19 zbog nedostatka reznih pločica (zbog loše kvalitete rezne pločice dolazilo je do brzog istrošenja vrha alata, te njegovog pucanja, slika61) nije se moglo napraviti mjerenje za slučaj 6 i 7.



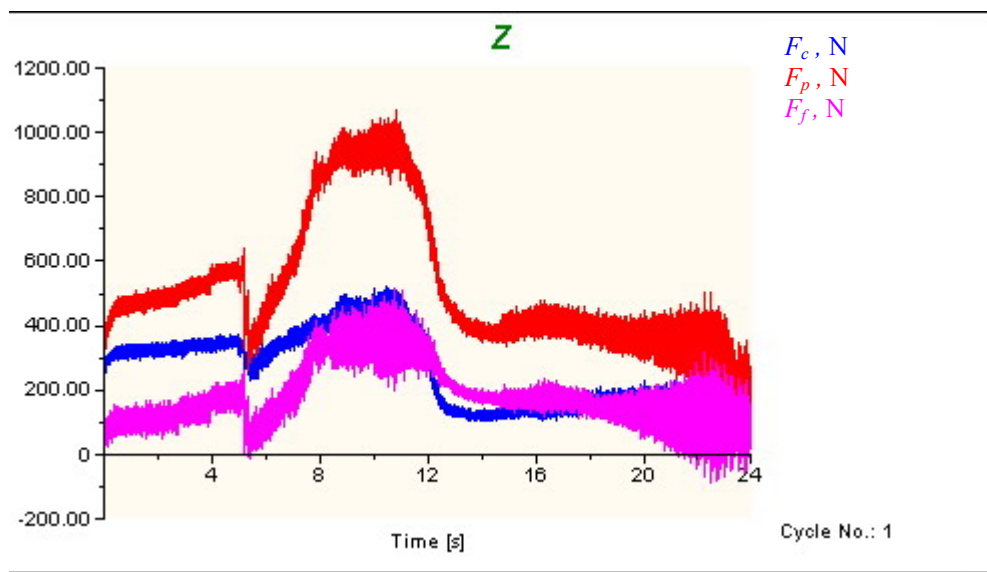
Slika 62. Sile rezanja u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 1



Slika 63. Sile rezanja u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 2

Iz slike 62 i 63 je vidljivo da s povećanjem dubine rezanja raste i sila rezanja, šta je za očekivati i u skladu s teorijom. U eksperimentu 2 pri dubini rezanja od 0,4 mm došlo je do istrošenja vrha rezne pločice i njegovog puknuća i sa time do povećanja sila rezanja. Na slici 64 prikazan je dijagramski prikaz mjerenja komponenti sila rezanja nastalog mjerenjem s

uređajem Kistler, te snimanim u softvare-u „Dynowear“ prilikom pucanja vrha reznog alata pri dubini rezanja 0,6 mm.



Slika 64. Dijagramski prikaz komponenti sila rezanja prilikom pucanja vrha reznog alata pri dubini rezanja 0,6 mm

5.3.3.3. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja

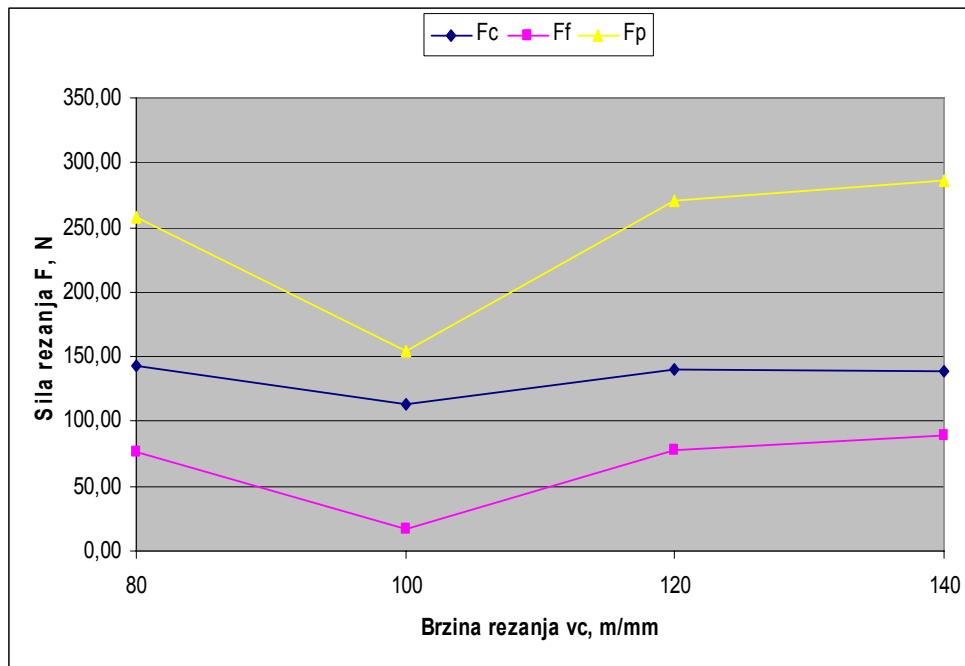
Vrijednosti rezultata sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja prikazane su tablicom 21 i 22, te dijagramski slikom 65 i 66.

Tablica 21. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 1

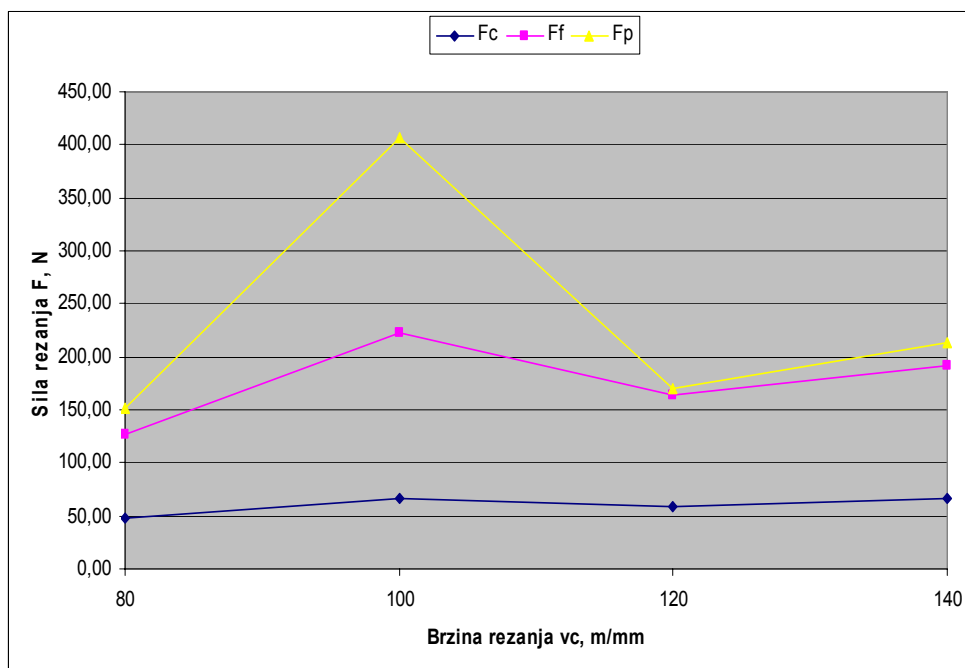
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	80	0,3	0,08	76,06	257,30	143,78
2	100	0,3	0,08	16,44	154,76	113,79
3	120	0,3	0,08	78,59	270,05	139,89
4	140	0,3	0,08	88,69	286,15	139,17

Tablica 22. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja – Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	80	0,3	0,08	126,13	151,48	47,45
2	100	0,3	0,08	222,48	406,94	65,93
3	120	0,3	0,08	163,29	169,47	58,36
4	140	0,3	0,08	191,49	213,82	67,14



Slika 65. Sile rezanja u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 1



Slika 66. Sile rezanja u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 2

Iz slika 65 i 66 se može zaključiti da brzina rezanja u ispitivanom području 80 – 140 m/min nema značajnih utjecaja na promjenu vrijednosti sila rezanja. U oba eksperimenta pri brzini rezanja od 100 m/min vidljivo je povećanje/smanjenje sila rezanja, što je posljedica istrošenja vrha rezne oštrice.

5.3.4. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti obradka pri obradi reznom pločicom CNGA 120404 TIN 23

5.3.4.1. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku

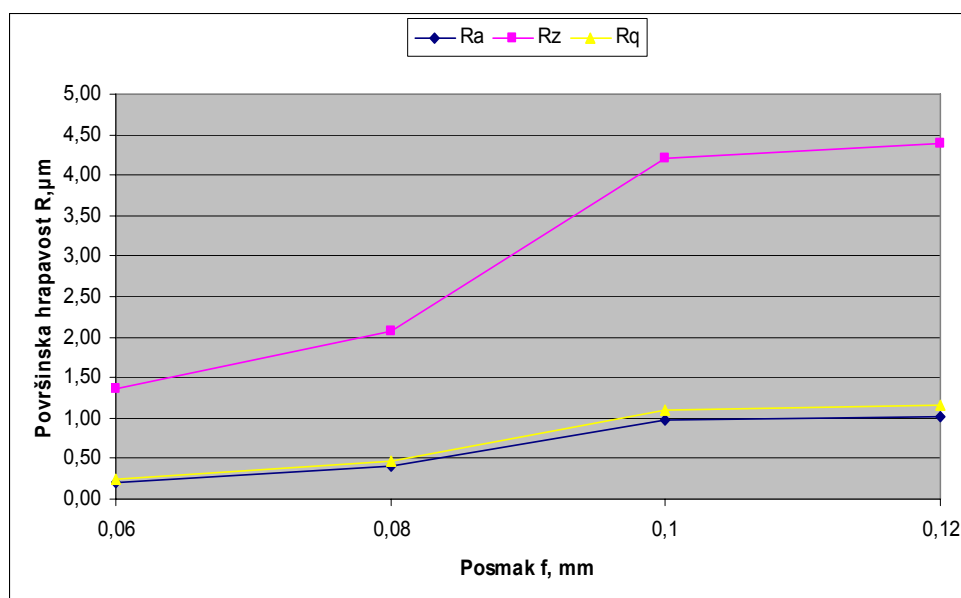
Srednje vrijednosti rezultata mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku prikazane su tablicom 23 i 24, te dijagramski slikom 67 i 68.

Tablica 23. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 1

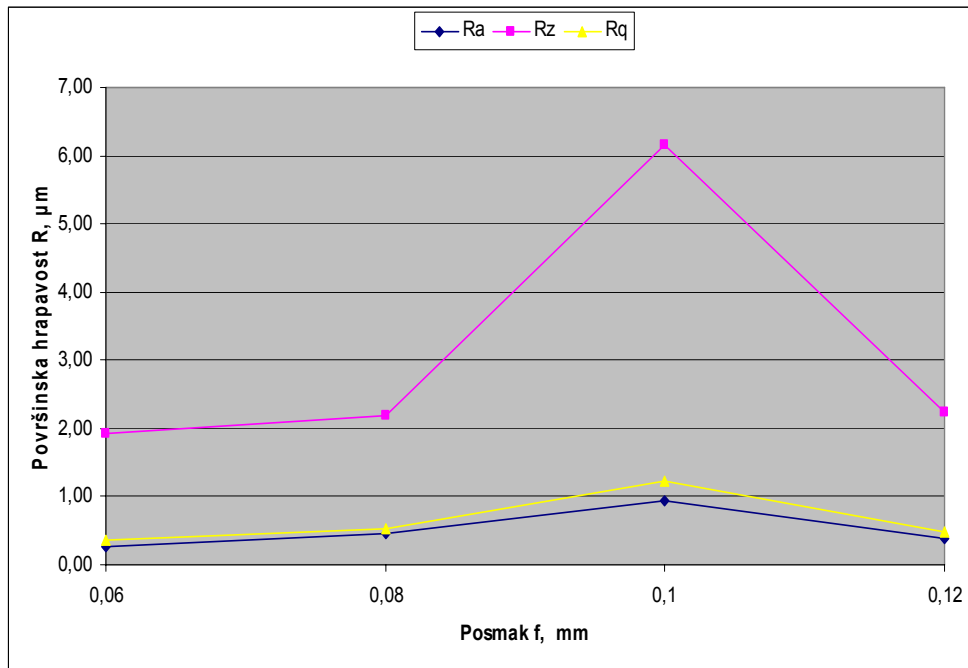
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,3	0,06	0,20	1,37	0,25
2	100	0,3	0,08	0,41	2,08	0,47
3	100	0,3	0,1	0,97	4,21	1,10
4	100	0,3	0,12	1,01	4,39	1,16

Tablica 24. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku – Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,3	0,06	0,27	1,93	0,35
2	100	0,3	0,08	0,45	2,19	0,53
3	100	0,3	0,1	0,94	6,15	1,22
4	100	0,3	0,12	0,39	2,23	0,49



Slika 67. Površinska hrapavost u ovisnosti o posmaku za eksperiment 1



Slika 68. Površinska hrapavost u ovisnosti o posmaku za eksperiment 2

Iz slika 67 i 68 je vidljivo da je s povećanjem vrijednosti posmaka došlo i do povećanja površinske hrapavosti, što je poznavajući teoriju sasvim normalna pojava. U eksperimentu 2 pri posmaku 0,12 mm površinska hrapavost je manje vrijednosti iz razloga što je ovo mjerenje vršeno pri samome kraju eksperimenta, te je već došlo do zaobljenja vrha oštrice alata, a s time i do obrade s većim radijusom vrha oštrice alata. Poznavajući teoriju rezanja možemo zaključiti da je to uzrok manje površinske hrapavosti.

5.3.4.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja

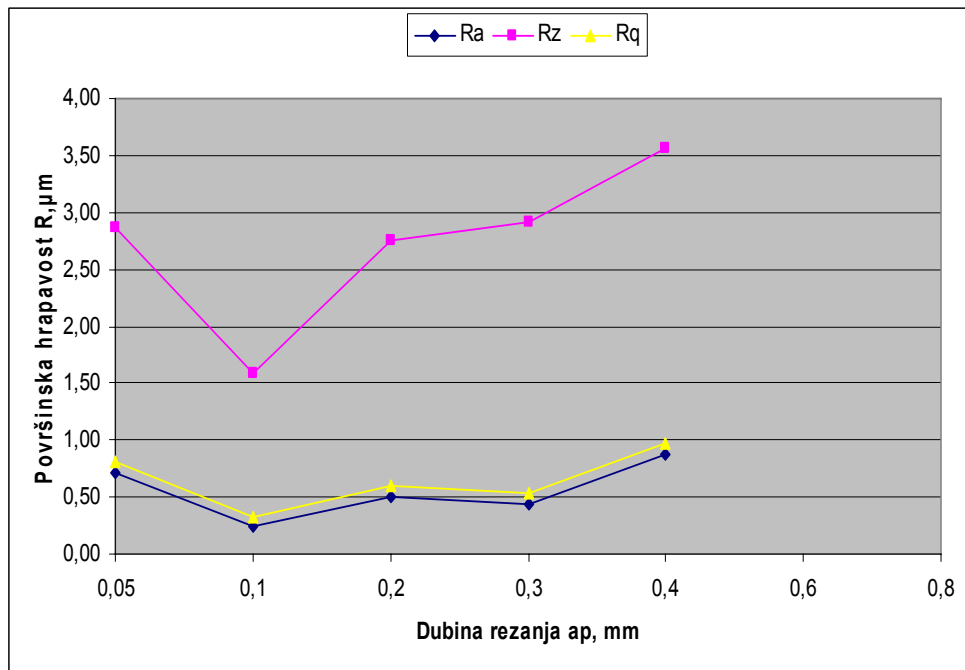
Srednje vrijednosti rezultata mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja prikazane su tablicom 25 i 26, te dijagramski slikom 69 i 70.

Tablica 25. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 1

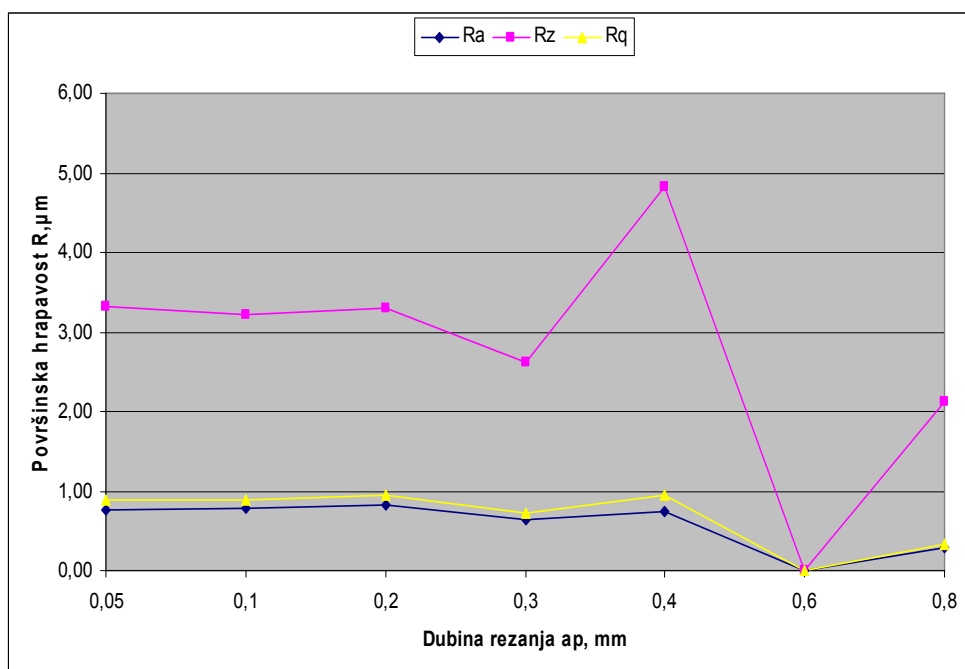
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,05	0,08	0,71	2,87	0,81
2	100	0,1	0,08	0,25	1,59	0,32
3	100	0,2	0,08	0,50	2,75	0,60
4	100	0,3	0,08	0,43	2,92	0,54
5	100	0,4	0,08	0,87	3,57	0,97
6	100	0,6	0,08	-	-	-
7	100	0,8	0,08	-	-	-

Tablica 26. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,05	0,08	0,76	3,31	0,88
2	100	0,1	0,08	0,78	3,21	0,88
3	100	0,2	0,08	0,83	3,30	0,94
4	100	0,3	0,08	0,64	2,61	0,73
5	100	0,4	0,08	0,74	4,82	0,94
6	100	0,6	0,08	0,00	0,00	0,00
7	100	0,8	0,08	0,28	2,12	0,34

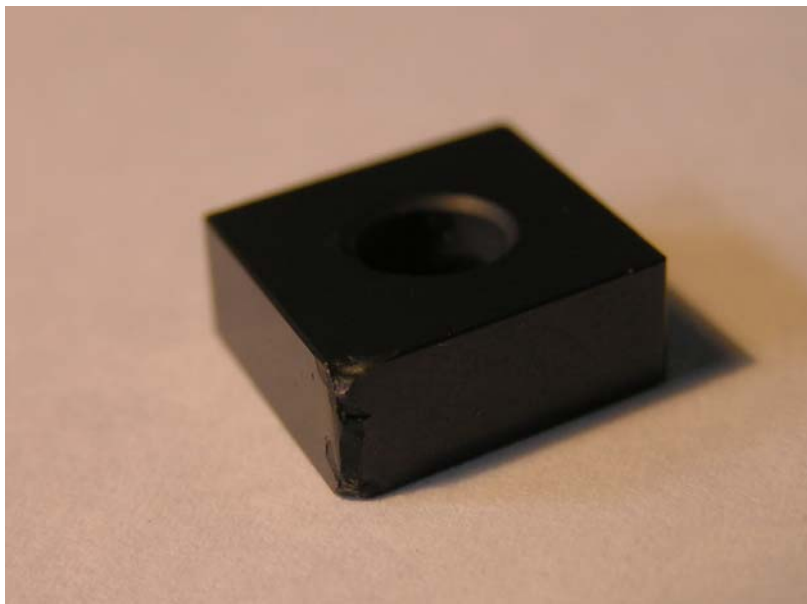


Slika 69. Površinska hrapavost u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 1



Slika 70. Površinska hrapavost u ovisnosti o dubini rezanja za eksperiment 2

Iz slike 70 je vidljivo da promjena dubine rezanja od 0,05 – 0,4 mm neznatno utječe na površinsku hrapavost, dok na dubinama rezanja većim od 0,4 mm dolazi do povećanog trošenja vrha oštrice alata, a s time i odstupanja u mjerenju, slika 71. Iz slike 69 se vidi kako trošenje vrha oštrice alata utječe na variranje površinske hrapavosti.



Slika 71. Puknuće vrha oštrice alata pri režimima obrade

$$v_c = 100 \text{ m/min}, \quad a_p = 0,6 \text{ mm}, \quad f = 0,08 \text{ mm}$$

5.3.4.3. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja

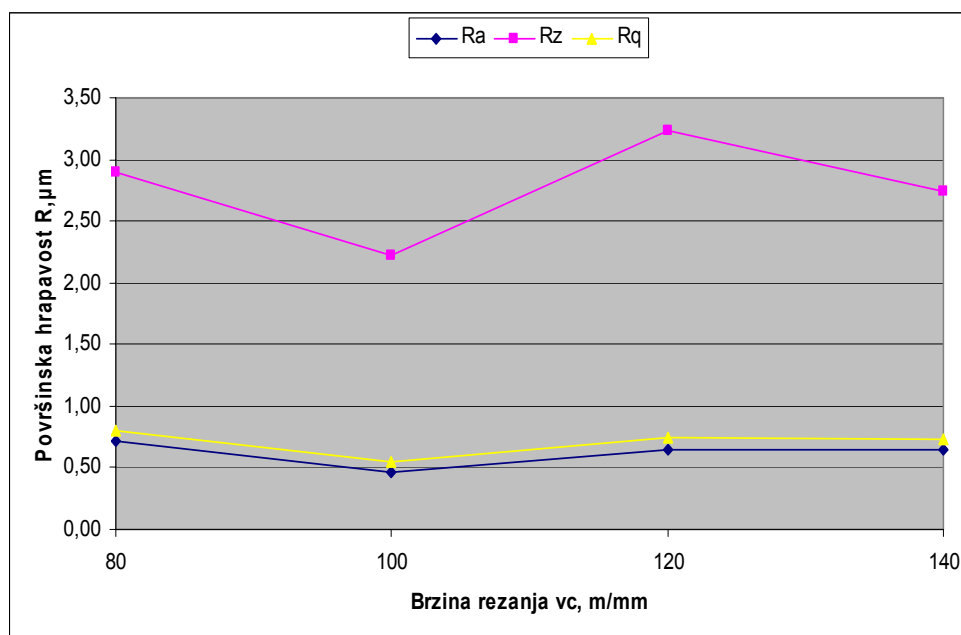
Srednje vrijednosti rezultata mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja prikazane su tablicom 27 i 28, te dijagramski slikom 72 i 73.

Tablica 27. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja –
Eksperiment 1

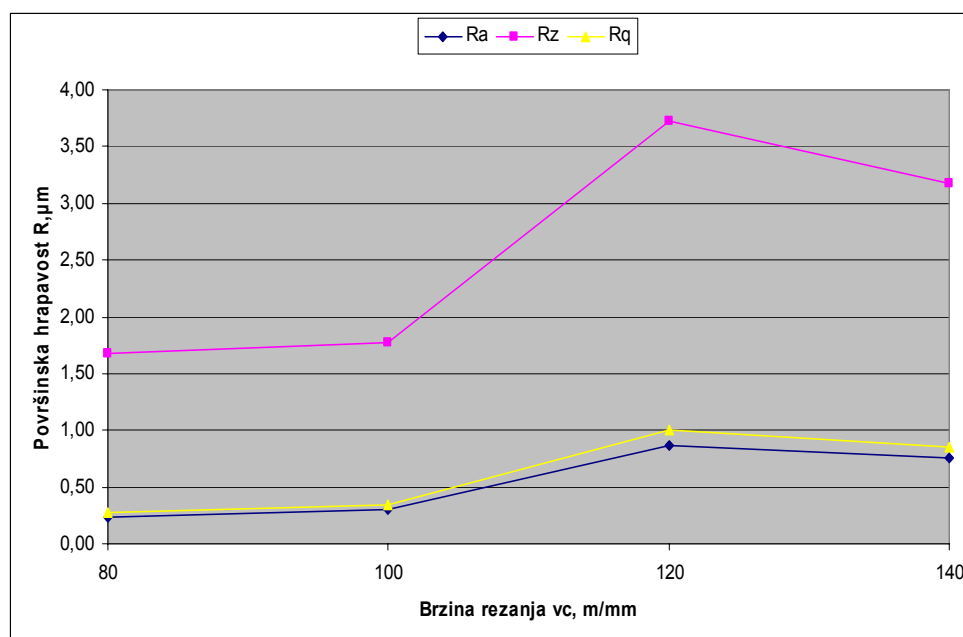
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	80	0,3	0,08	0,71	2,90	0,80
2	100	0,3	0,08	0,47	2,22	0,55
3	120	0,3	0,08	0,64	3,23	0,74
4	140	0,3	0,08	0,64	2,74	0,73

Tablica 28. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja –
Eksperiment 2

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	80	0,3	0,08	0,23	1,68	0,28
2	100	0,3	0,08	0,30	1,78	0,35
3	120	0,3	0,08	0,87	3,72	1,00
4	140	0,3	0,08	0,76	3,18	0,85



Slika 72. Površinska hrapavost u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 1



Slika 73. Površinska hrapavost u ovisnosti o brzini rezanja za eksperiment 2

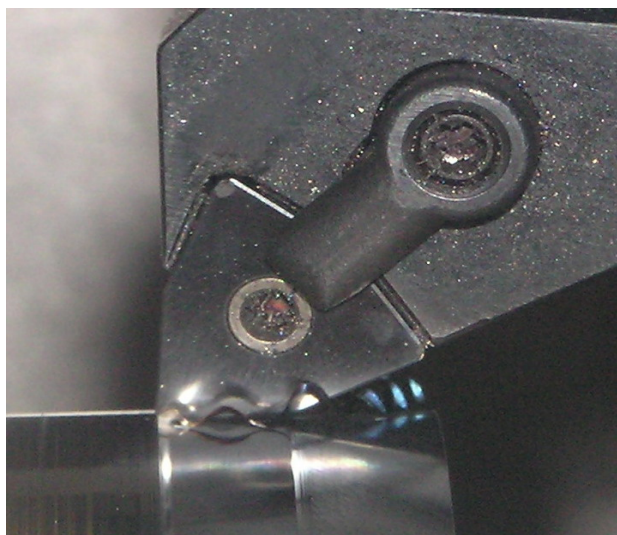
Iz slike 72 je vidljivo da s povećanjem brzine rezanja površinska hrapavost opada, ali u manjem iznosu, što je sukladno s teorijom o klasičnom tokarenju. Na slici 73 se vidi da s povećanjem brzine rezanja dolazi do povećanja površinske hrapavosti, što možemo pripisati istrošenom vrhu oštice alata (opisano u prijašnjim poglavljima), pa je vjerovano to razlog za dvostruko povećanje površinske hrapavosti pri većim brzinama rezanja.

5.4. Usporedba rezultata mjerenja sila rezanja i površinske hrapavosti pri obradi reznom pločicom od keramike (CNGA 120408 TIN22) i reznom pločicom od CBN-a (WNMA 080408 CBN300)

Unutar ovog poglavlja biti će uspoređeni rezultati mjerenja sila rezanja i površinske hrapavosti koje smo izmjerili pri obradi reznom pločicom od keramike CNGA 120408 TIN22 (opisanom u poglavlju 5.2.), te reznom pločicom od CBN-a WNMA 080408 CBN300, tablica 29. U oba eksperimenta uređaj za mjerenje sila je bio postavljen u vertikalni položaj (Eksperiment 1), te je radijus vrha pločice $r_\epsilon = 0,8$ mm.

Tablica 29. Rezna pločica za tokarenje otvrdnutih materijala [10]

Tip rezne pločice	Brzina rezanja v_c , m/min	Posmak f , mm	Dubina rezanja a_p , mm	Tip obrade
CBN 300	50 – 150	0,1 – 0,3	0,05 – 3	Bez hlađenja
CBN 200	50 – 120	0,05 – 0,25	0,05 – 1,5	Bez hlađenja
CBN 150	70 – 150	0 – 0,20	0,05 – 1,5	Bez hlađenja
CBN 10	100 - 180	0 – 0,15	0,05 – 0,5	Bez hlađenja



Slika 74. Rezna pločica WNMA 080408 CBN300

5.4.1. Rezultati mjerenja komponenti sila rezanja

5.4.1.1. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku

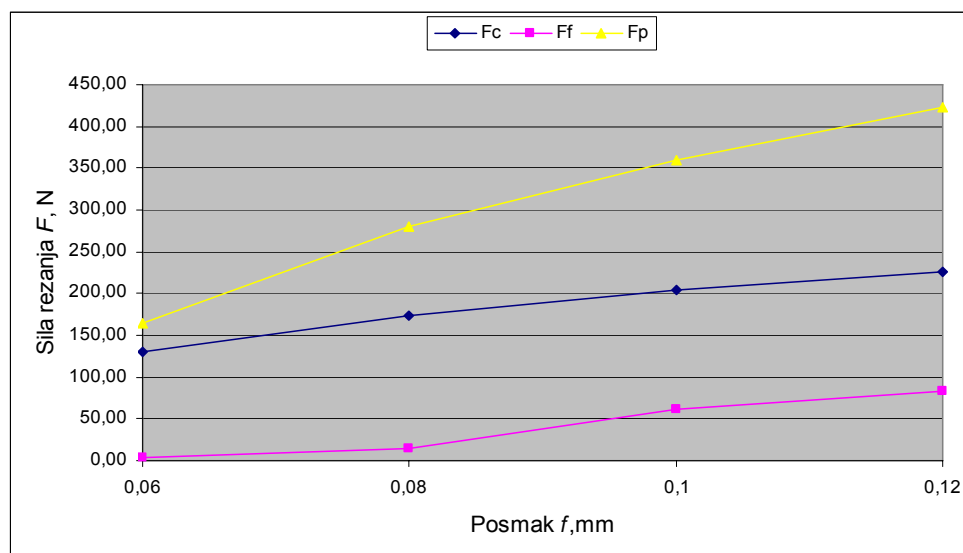
Vrijednosti rezultata sila rezanja u ovisnosti o posmaku prikazane su tablicom 30 i 31, te dijagramski slikom 75 i 76.

Tablica 30. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku – CNGA 120408 TIN22

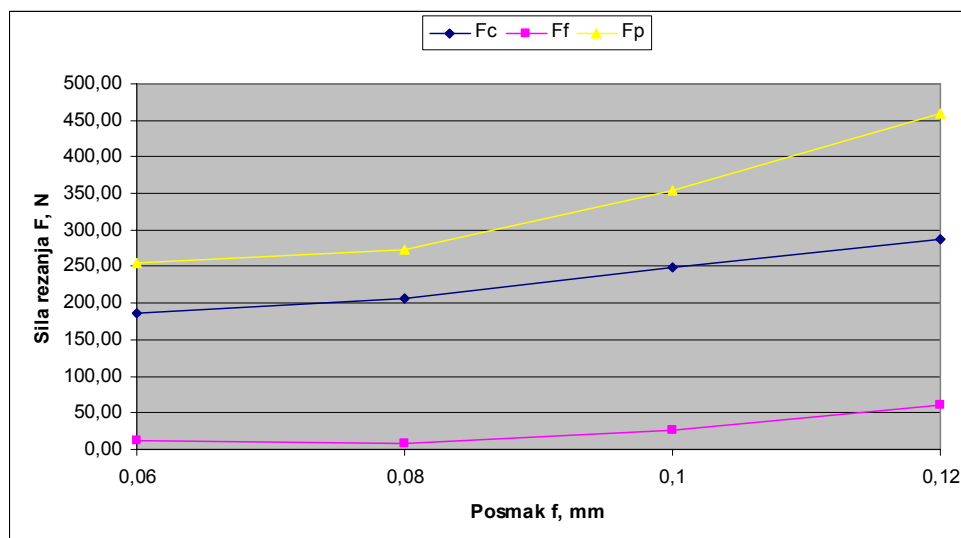
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	100	0,3	0,06	2,86	164,52	129,37
2	100	0,3	0,08	14,76	279,89	172,85
3	100	0,3	0,1	62,24	359,67	204,45
4	100	0,3	0,12	83,99	422,64	225,96

Tablica 31. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o posmaku – WNMA 080408 CBN300

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	100	0,3	0,06	11,55	255,85	186,45
2	100	0,3	0,08	8,95	274,14	206,67
3	100	0,3	0,1	26,28	354,68	248,78
4	100	0,3	0,12	60,32	459,38	287,20



Slika 75. Ovisnost sila rezanja o posmaku za CNGA 120408 TIN22



Slika 76. Ovisnost sila rezanja o posmaku za WNMA 080408 CBN300

Iz slika 75 i 76 je vidljivo da se povećanjem vrijednosti posmaka povećavaju i sile rezanja, te je vidljivo da posmak podjednako utječe na sve tri komponente sile rezanja. Isto je vidljivo da pri obradi reznom pločicom od CBN-a sile rezanja imaju veće vrijednosti nego pri obradi s reznom pločicom od keramike.

5.4.1.2. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja

Vrijednosti rezultata sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja prikazane su tablicom 32 i 33, te dijagramski slikom 77 i 78.

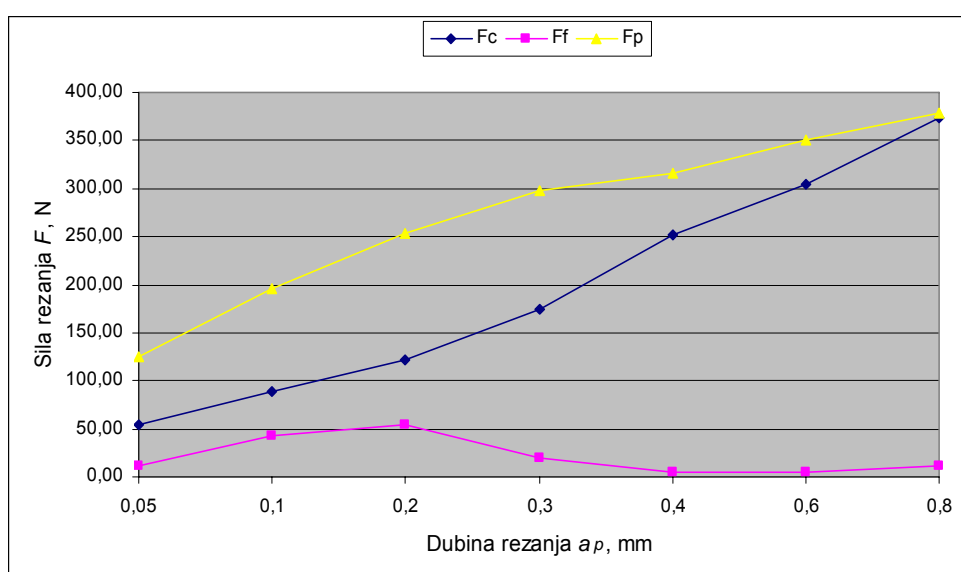
Tablica 32. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja –
CNGA 120408 TIN22

	v_c , m/min	a_{p2} , mm	f_s , mm	F_{f2} , N	F_{p2} , N	F_{c2} , N
1	100	0,05	0,08	11,27	124,66	54,83
2	100	0,1	0,08	43,28	196,70	88,72
3	100	0,2	0,08	53,64	253,76	122,32
4	100	0,3	0,08	19,23	297,92	174,88
5	100	0,4	0,08	4,24	315,56	251,36
6	100	0,6	0,08	4,82	350,88	304,13
7	100	0,8	0,08	11,56	377,98	372,93

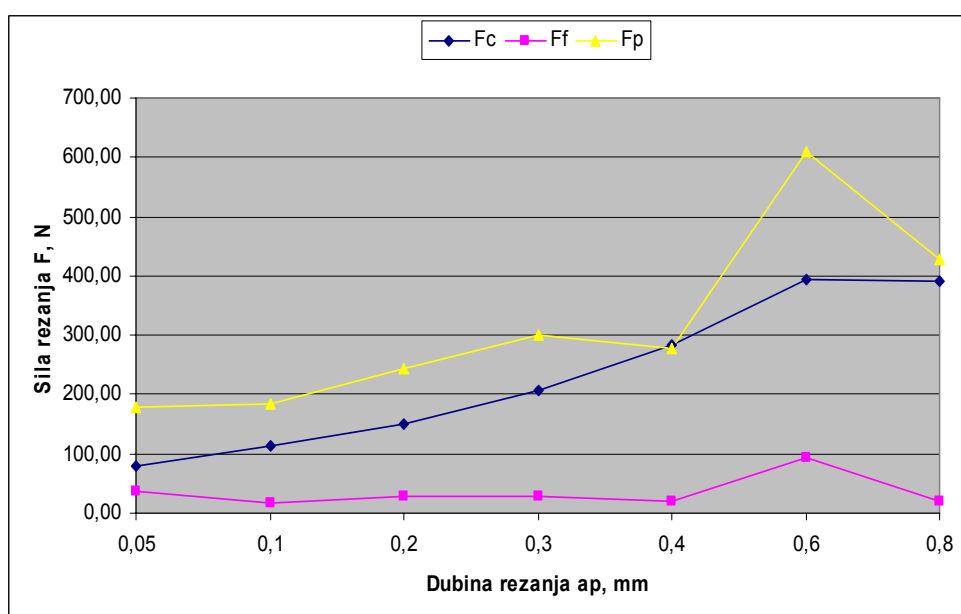
Tablica 33. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o dubini rezanja –

WNMA 080408 CBN300

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	100	0,05	0,08	36,68	177,66	79,26
2	100	0,1	0,08	16,24	184,47	113,39
3	100	0,2	0,08	29,64	243,63	149,60
4	100	0,3	0,08	27,70	301,65	205,59
5	100	0,4	0,08	21,14	279,14	284,18
6	100	0,6	0,08	92,17	609,38	393,54
7	100	0,8	0,08	20,91	428,56	391,78



Slika 77. Ovisnost sila rezanja o dubini rezanja za CNGA 120408 TIN22



Slika 78. Ovisnost sila rezanja o dubini rezanja za WNMA 080408 CBN300

Iz slike 77 i 78 se uočava porast svih komponenti sila rezanja s porastom dubine rezanja, što je u skladu s teorijom. Iz slike 78 je vidljivo da pri dubini rezanja 0,6 mm vrijednost sila rezanja odstupaju, što je posljedica istrošenja vrha oštrice alata. Isto je vidljivo da pri obradi reznom pločicom od CBN-a sile rezanja imaju veće vrijednosti nego pri obradi s reznom pločicom od keramike.

5.4.1.3. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja

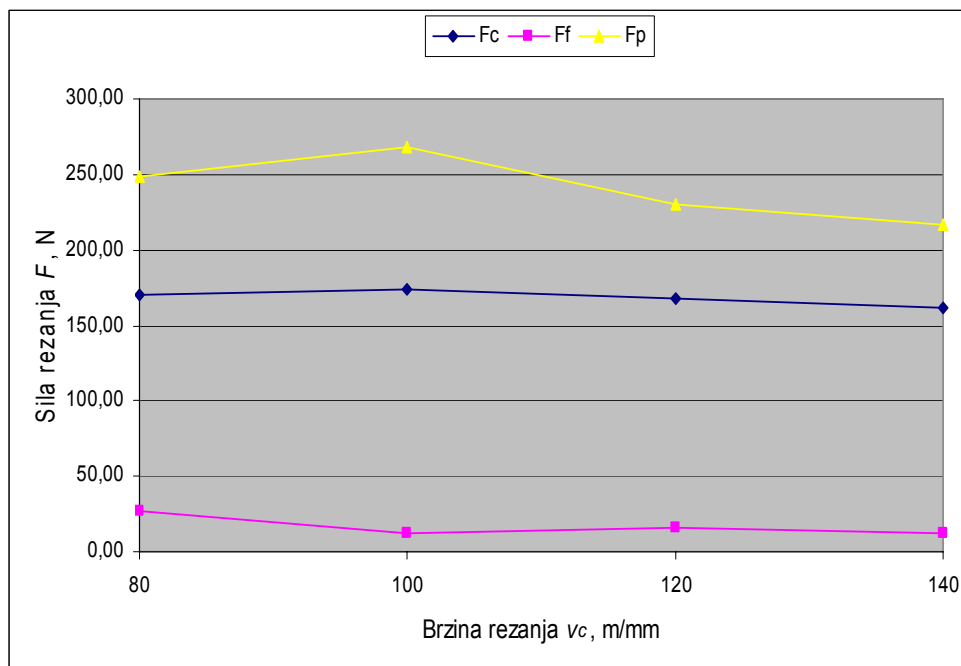
Vrijednosti rezultata sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja prikazane su tablicom 34 i 35, te dijagramski slikom 79 i 80.

Tablica 34. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja –
CNGA 120408 TIN22

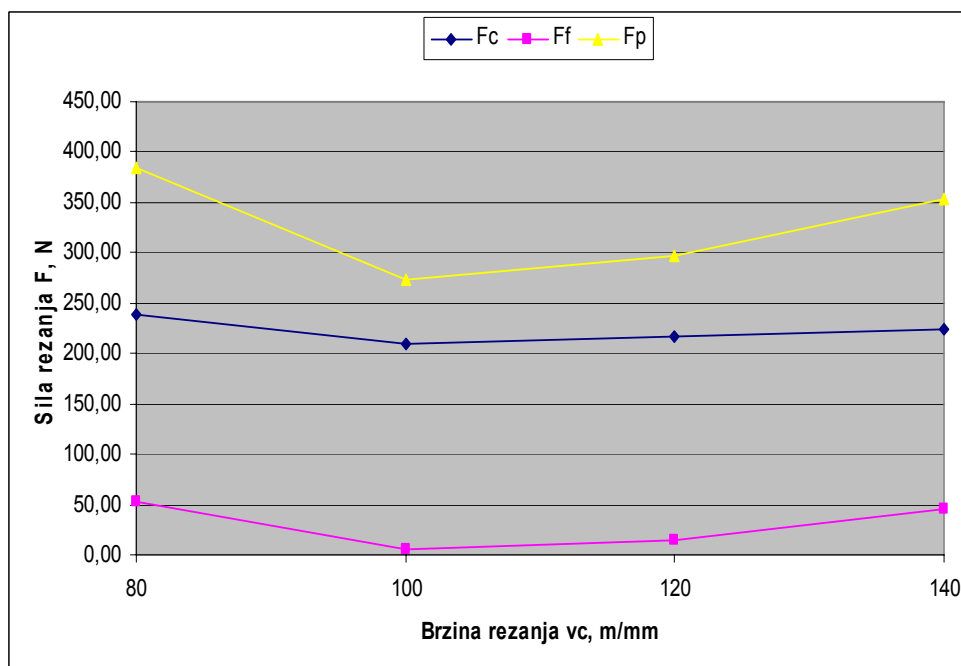
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	80	0,3	0,08	26,60	248,96	170,73
2	100	0,3	0,08	12,24	268,11	173,68
3	120	0,3	0,08	15,73	230,34	168,14
4	140	0,3	0,08	12,42	216,73	161,21

Tablica 35. Rezultati mjerenja sila rezanja u ovisnosti o brzini rezanja –
WNMA 080408 CBN300

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	F_f , N	F_p , N	F_c , N
1	80	0,3	0,08	53,59	385,00	238,88
2	100	0,3	0,08	5,93	272,79	209,32
3	120	0,3	0,08	14,76	297,53	216,62
4	140	0,3	0,08	45,00	352,99	224,68

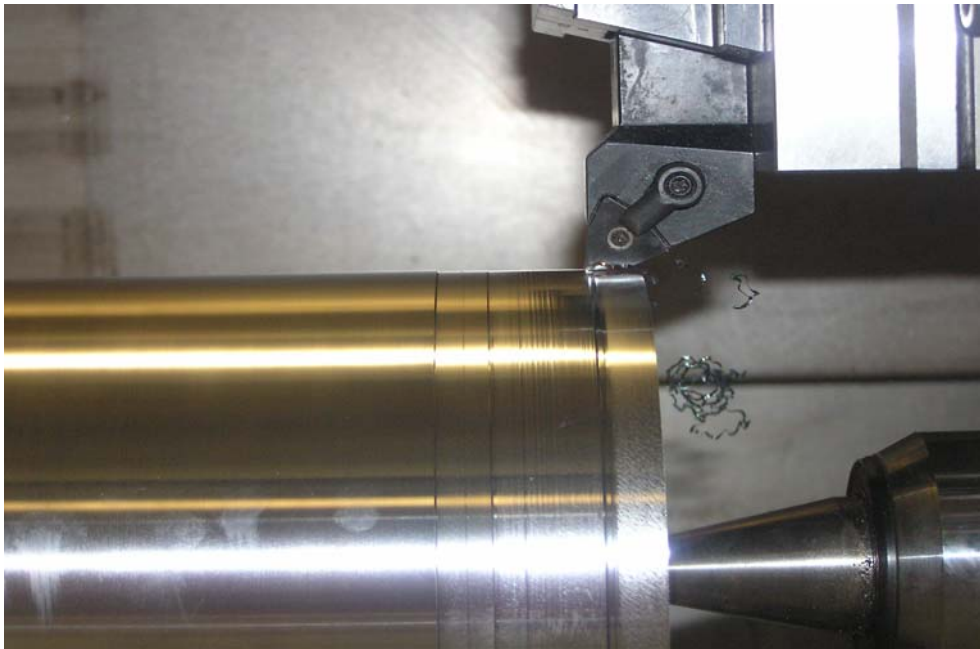


Slika 79. Ovisnost sila rezanja o brzini rezanja za CNGA 120408 TIN22



Slika 80. Ovisnost sila rezanja o brzini rezanja za WNMA 080408 CBN300

Iz slike 79 je vidljivo da brzina rezanja u ispitivanom području 80 – 140 m/min nema značajniji utjecaj na sile rezanja. Iz slike 80 je vidljivo da sila rezanja pri brzini rezanja od 80 m/min ima najveću vrijednost, što je posljedica nastanka vibracija prilikom obrade. Isto je vidljivo da pri obradi reznom pločicom od CBN-a sile rezanja imaju veće vrijednosti nego pri obradi s reznom pločicom od keramike.



Slika 81. Obrada reznom pločicom od CBN-a pri režimima obrade

$$v_c = 140 \text{ m/min}, a_p = 0,3 \text{ mm}, f = 0,08 \text{ mm}$$

5.4.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti obradka

5.4.2.1. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti obradka u ovisnosti o posmaku

Srednje vrijednosti rezultata mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku prikazane su tablicom 36 i 37, te dijagramski slikom 82 i 83.

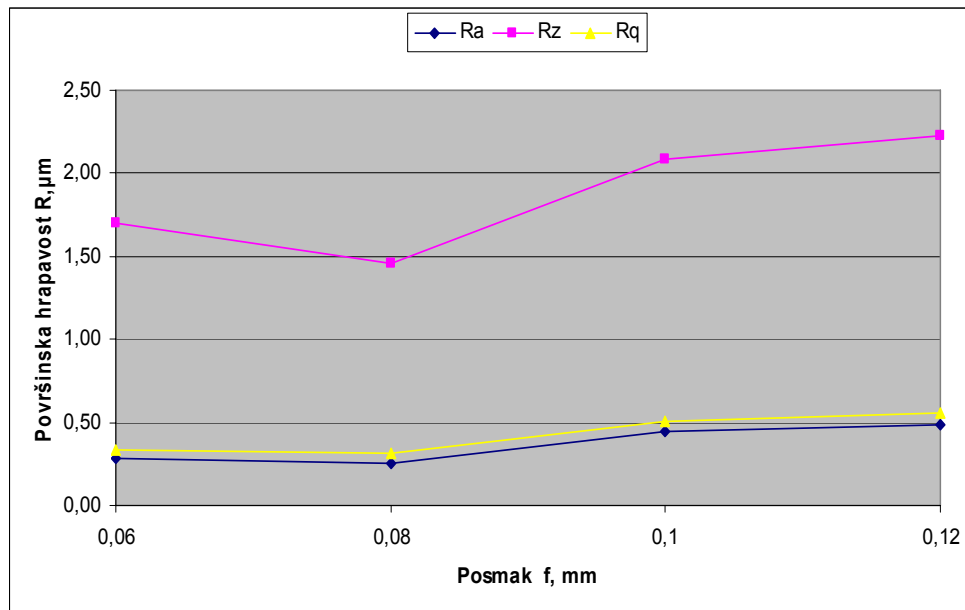
Tablica 36. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku –
CNGA 120408 TIN 22

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,3	0,06	0,28	1,70	0,33
2	100	0,3	0,08	0,25	1,46	0,31
3	100	0,3	0,1	0,45	2,09	0,51
4	100	0,3	0,12	0,49	2,23	0,56

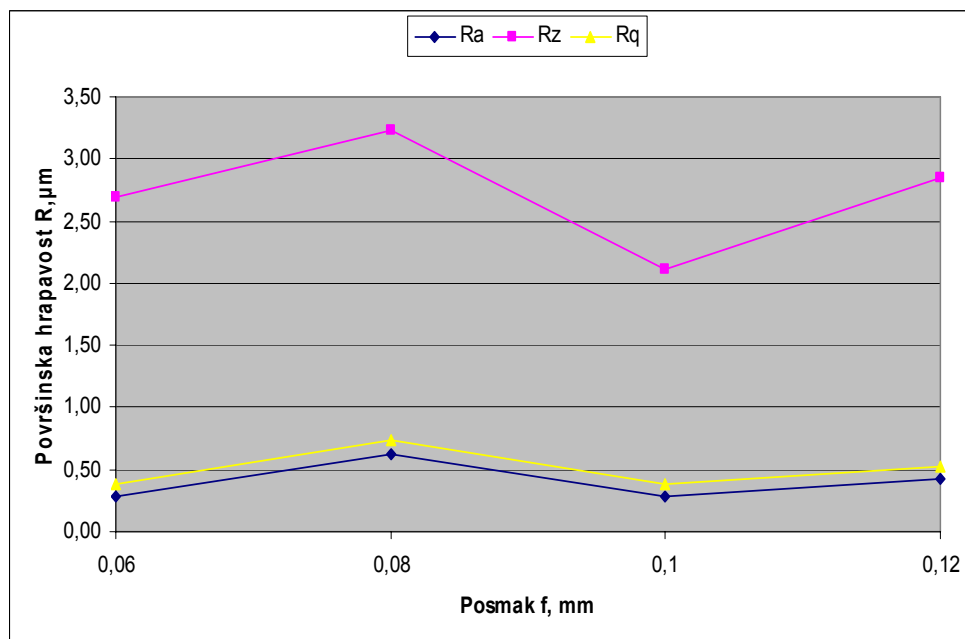
Tablica 37. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o posmaku –

WNMA 080408 CBN300

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,3	0,06	0,28	2,69	0,38
2	100	0,3	0,08	0,62	3,23	0,74
3	100	0,3	0,1	0,29	2,11	0,38
4	100	0,3	0,12	0,43	2,85	0,52



Slika 82. Ovisnost površinske hrapavosti o posmaku za CNGA 120408 TIN22



Slika 83. Ovisnost površinske hrapavosti o posmaku za WNMA 080408 CBN300

Iz slike 82 vidljivo je da s povećanjem vrijednosti posmaka dolazi do povećanja površinske hrapavosti obradka, što je sukladno s teorijom. Iz slike 83 je vidljivo da pri posmaku 0,08 mm površinska hrapavost ima najveću vrijednost, što je posljedica omatanja kontinuirane odvojene čestice oko noža i njenog struganja po površini obradka, dok za ostale vrijednosti s povećanjem posmaka povećava se i površinska hrapavost. Isto je vidljivo da su vrijednosti površinske hrapavosti podjednake za obje vrste reznih pločica.

5.4.2.2. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti obradka u ovisnosti o dubini rezanja

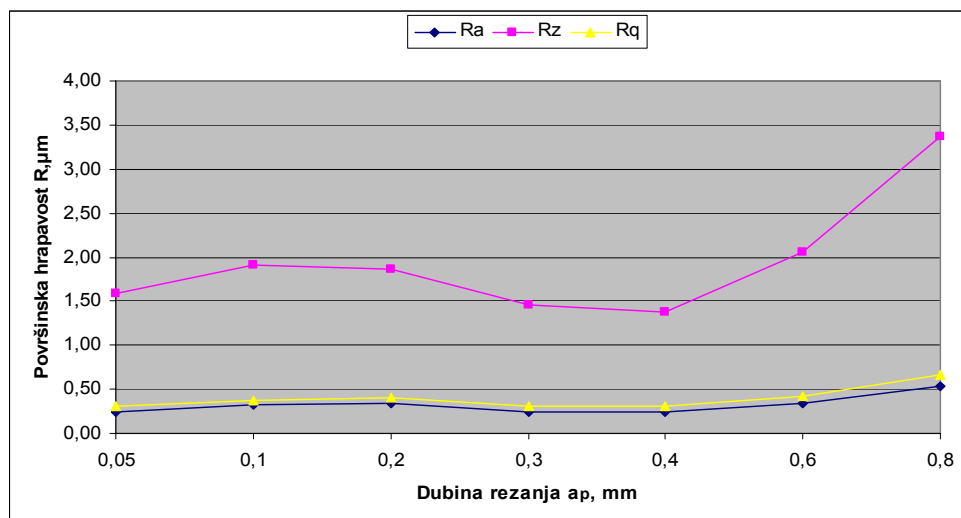
Srednje vrijednosti rezultata mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja prikazane su tablicom 38 i 39, te dijagramski slikom 84 i 85.

Tablica 38. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – CNGA 120408 TIN22

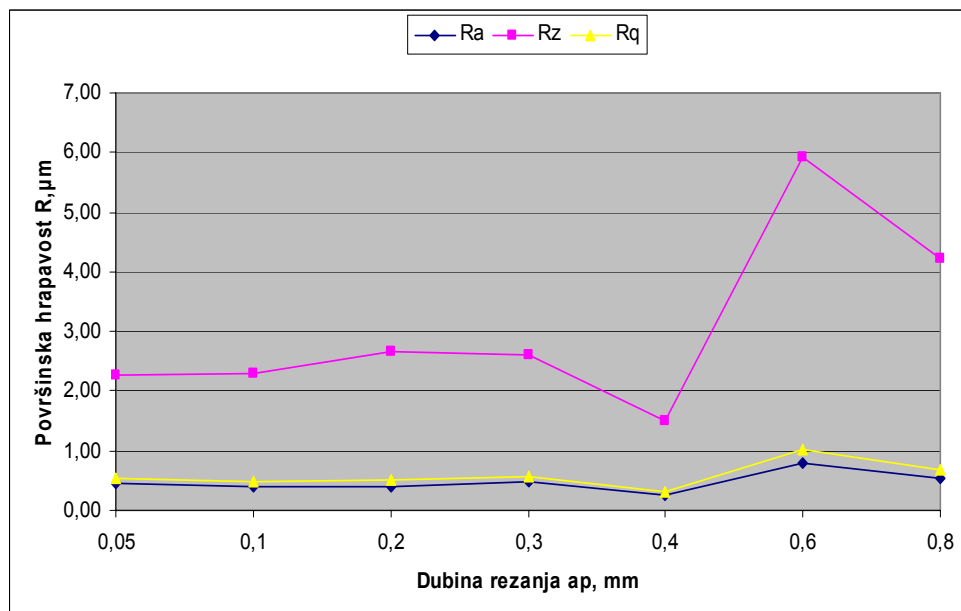
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,05	0,08	0,25	1,59	0,30
2	100	0,1	0,08	0,32	1,91	0,38
3	100	0,2	0,08	0,34	1,86	0,40
4	100	0,3	0,08	0,25	1,46	0,31
5	100	0,4	0,08	0,25	1,37	0,30
6	100	0,6	0,08	0,34	2,05	0,42
7	100	0,8	0,08	0,54	3,37	0,66

Tablica 39. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o dubini rezanja – WNMA 080408 CBN300

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	100	0,05	0,08	0,44	2,26	0,53
2	100	0,1	0,08	0,41	2,29	0,49
3	100	0,2	0,08	0,40	2,67	0,50
4	100	0,3	0,08	0,49	2,60	0,58
5	100	0,4	0,08	0,25	1,51	0,30
6	100	0,6	0,08	0,80	5,91	1,01
7	100	0,8	0,08	0,55	4,22	0,69



Slika 84. Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja za CNGA 120408 TIN2



Slika 85. Ovisnost površinske hrapavosti o dubini rezanja za WNMA 080408 CBN300

Iz slike 84 i 85 je vidljivo da promjena dubine rezanja neznatno utječe na površinsku hrapavost, što je u suprotnosti s očekivanjem jer kod konvencionalnog tokarenja s povećanjem dubine rezanja povećava se i površinska hrapavost. Pri obradi reznom pločicom WNMA 080408 CBN300 pri dubini rezanja 0,6 mm je došlo do istrošenja vrha oštrice alata pa je zato vrijednost površinske hrapavosti malo veća nego pri ostalim dubinama rezanja. Isto je vidljivo da Pri obradi reznom pločicom od CBN-a površinska hrapavost je nešto lošija nego pri obradi s reznom pločicom od keramike.

5.4.2.3. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti obradka u ovisnosti o brzini rezanja

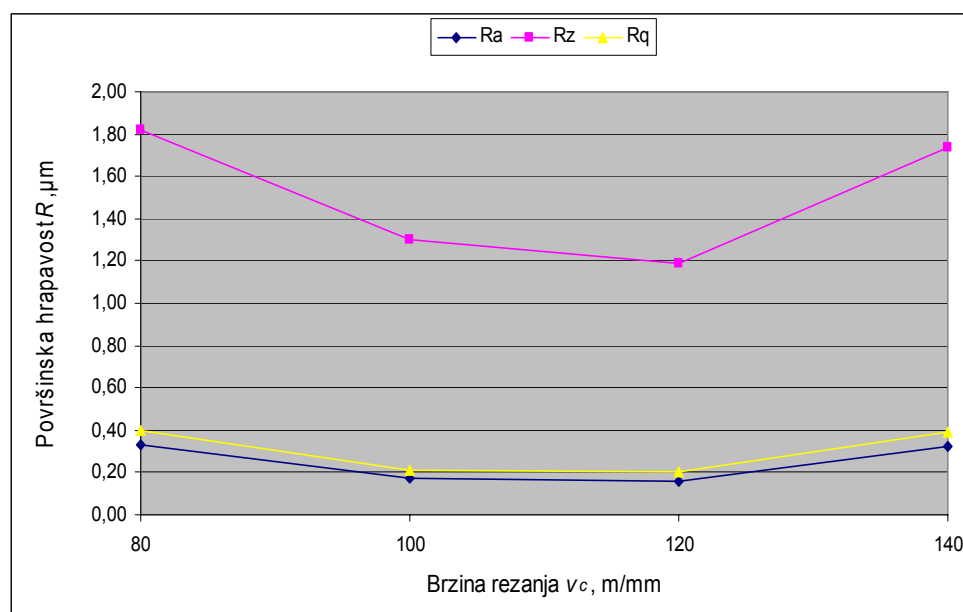
Srednje vrijednosti rezultata mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja prikazane su tablicom 40 i 41, te dijagramski slikom 86 i 87.

Tablica 40. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja – CNGA 120408 TIN22

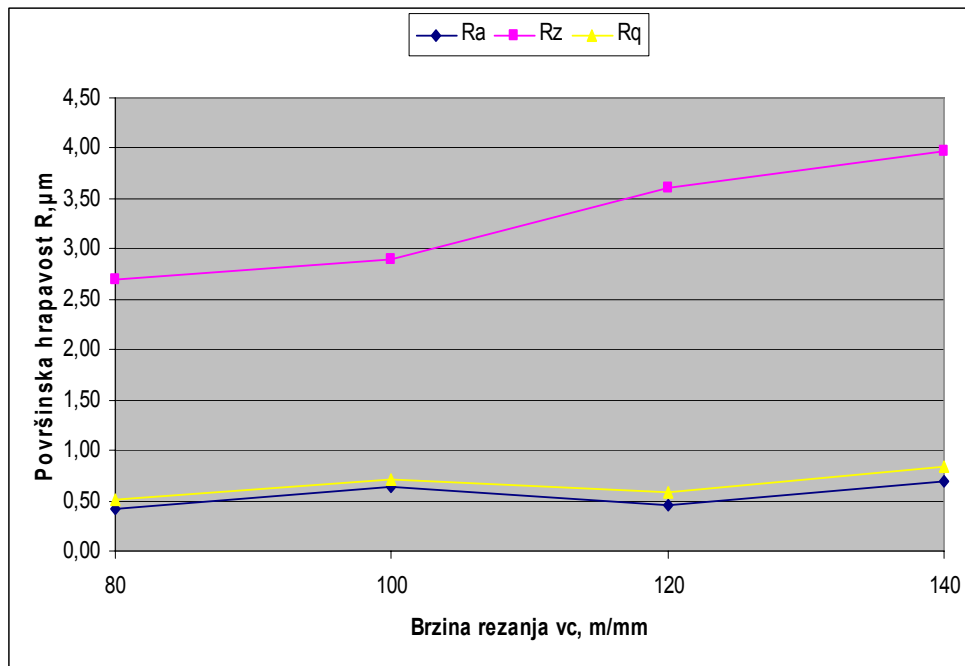
	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	80	0,3	0,08	0,33	1,77	0,38
2	100	0,3	0,08	0,22	1,63	0,27
3	120	0,3	0,08	0,31	1,95	0,36
4	140	0,3	0,08	0,31	1,63	0,36

Tablica 41. Rezultati mjerenja površinske hrapavosti u ovisnosti o brzini rezanja – WNMA 080408 CBN300

	v_c , m/min	a_p , mm	f , mm	Ra , μm	Rz , μm	Rq , μm
1	80	0,3	0,08	0,42	2,69	0,51
2	100	0,3	0,08	0,63	2,90	0,71
3	120	0,3	0,08	0,45	3,60	0,58
4	140	0,3	0,08	0,70	3,97	0,84



Slika 86. Ovisnost površinske hrapavosti o brzini rezanja za CNGA 120408 TIN22



Slika 87. Ovisnost površinske hrapavosti o brzini rezanja za WNMA 080408 CBN300

Iz slike 86 je vidljivo da su najveće vrijednosti površinske hrapavosti postignute pri najmanjoj vrijednosti brzine rezanja od 80 m/min. Gledajući raspon brzina rezanja 80-120 m/min, uočava se minimum pri 100 m/min. Iz slike 87 je vidljivo da s povećanjem brzine rezanja raste i površinska hrapavost, što je suprotno teoriji. Isto je vidljivo da pri obradi s CBN-om vrijednosti površinske hrapavosti imaju 50% veće vrijednosti nego pri obradi s keramikom. Te dvije činjenice bi mogli pripisati tome što su mjerenja vršena zadnja pa je vjerovatno vrh oštrice alata bio istrošen.

6. ZAKLJUČAK

Eksperimentalnim istraživanjem koje je provedeno u Laboratoriju za alatne strojeve, FSB – Zagreb, željela se utvrditi mogućnosti primjene procesa tokarenja pri obradi dijelova povišene tvrdoće i usporediti proces tvrdog tokarenja prilikom obrade s reznom pločicom od keramike i CBN-a, te je ispitivali krutost naprave za prihvat mjerača sila. Ispitivanje obrade otvrdnutih materijala tvrdim tokarenjem je vrednovano pomoću dva kriterija :

- površinske hrapavosti obrađene površine
- sila rezanja

Uspoređujući vrijednosti sila i hrapavosti koji se javljaju pri procesu obrade otvrdnutih materijala za dva različita slučaja i to slučaj gdje se koristi naprava za prihvat mjerača sila (horizontalni položaj) i bez korištenja dotične naprave (vertikalni položaj) pokušala se potvrditi pouzdanost sustava alat-stroj-obradak tj. krutost cjelokupnog alatnog stroja i naprave za prihvat uređaja za mjerenje sila. Nakon provedenih ispitivanja i analize sila došlo se do zaključka da je naprava u oba slučaja (vertikalni i horizontalni položaj) kruta i stabilno pričvršćena na revolversku glavu tj. nije bilo pojave vibracija tijekom procesa tvrdog tokarenja. Iz izostanka pojave vibracija se isto tako može zaključiti da je krutost alatnog stroja vrlo visoka.

Iz eksperimenta se može zaključiti da promjena brzine rezanja neznatno utječe na vrijednosti sila rezanja. Natražna sila rezanja F_p prilikom promjene brzine rezanja je najveća. Kod promjena posmaka, vrijednosti sila rezanja su se mijenjale prema očekivanju. Povećanjem posmaka i vrijednosti sila rezanja su se također povećavale. Može se zaključiti da se povećanjem vrijednosti posmaka pri tvrdom tokarenju dobila slična ovisnost za sve tri sile rezanja i to takva da su sile slijedile linearni prirast. Najveću vrijednost pri eksperimentu je imala natražna sila rezanja F_p , a najmanju posmična F_f , što potvrđuju i navodi iz literature. Povećanjem dubine rezanja i vrijednosti sila rezanja su se povećavala što je sukladno s teorijom.

Pri postupku tvrdog tokarenja reznom pločicom oznake CNGA 120408 TIN22 i reznom pločicom oznake WNMA 080408 CBN300 vrijednosti površinske hrapavosti su dobivene u rasponu $R_a = 0,2 - 0,8 \mu\text{m}$, te zbog ostvarene hrapavosti $R_a < 0,8 \mu\text{m}$ i klase N6, ova se obrade mogu svrstati u finu obradu. Pri postupku tvrdog tokarenja keramičkom reznom

pločicom oznake CNGA 120404 TIN23 vrijednosti površinske hrapavosti su dobivene u rasponu $R_a = 0,2 - 1 \mu\text{m}$. Razlog dobivenih lošijih vrijednosti površinske hrapavosti je lošija kvaliteta rezne pločice, te njeno brže trošenje prilikom obrade (može se pretpostaviti da je glavni razlog brzog trošenja rezne pločice što se eksperiment obavljao pri brzini rezanja $v_c=100 \text{ m/min}$, koja je kritična zato jer parametri zadani od proizvođača reznih pločica tvrde da ja max. brzina rezanja za ovu kvalitetu rezne pločice 100 m/min)

Iako proizvođači reznih alata tvrde da pločica od CBN-a ima znatno bolja svojstva od rezne keramike, uspoređujući rezultate nastale prilikom obrade otvrdnutih materijala s reznom pločicom od keramike (CNGA 120408 TIN22) i CBN-a (WNMA 080408 CBN300) vidljivo je da vrijednosti sila rezanja i površinske hrapavosti imaju mala odstupanja, te da su prilikom obrade reznom pločicom od keramike dobivene manje vrijednosti sila rezanja i površinske hrapavosti. Može se tvrditi da su prilikom eksperimenta obje pločice imale slična svojstva, te da je isplativije koristiti pločice od rezne keramike prvenstveno radi cijene (Cijena jedne pločice od keramike, sa četiri rezne oštrice je približno 100 kuna, dok pločica od CBN ima cijenu približno 850 kuna).

Rezultatima dobivenim ispitivanjem procesa tvrdog tokarenja pokazano je da u usporedbi s konvencionalnim postupkom obrade otvrdnutih materijala tokarenjem i brušenjem, omogućeno je povećanje proizvodnosti uz dobru kvalitetu obrađene površine. Nadalje, razvitkom materijala reznih alata i prevlaka, prvenstveno keramike i CBN, potvrđeno je da je moguća obrada tvrdim tokarenjem bez hlađenja tj. bez upotrebe SHIP-a. Iako su rezultati dobiveni istraživanjem bili zadovoljavajući, tvrdo tokarenje je proces koji zahtjeva daljnja istraživanja kako bi se poboljšali uvjeti i rezultati obrade tj. osigurala stabilnost procesa, a time i proces uvrstio u konvencionalne obrade otvrdnutih materijala.

7. LITERATURA

- [1] E.Zeren; t.Özel: Hard turning Technology, Report No MARL-01, The State University of New Jersey, Piscataway, June 2002.;
- [2] <http://www.titex.com> , katalog reznih alata, Titex, 2008., (1. listopada 2008.);
- [3] <http://www.fsb.hr/kas> , Procesi obrade odvajanjem (10. rujna 2007.);
- [4] <http://www.fsb.hr/kas>, Obrada deformiranjem i obrada odvajanjem;
- [5] Ekinović, S.: Obrada rezanjem, Dom štampe, Zenica, 2001.;
- [6] Filetin, T.; Kovačićek, F.; Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2002.;
- [7] Inženjerski priručnik IP4, Proizvodno strojarstvo, Materijali, Školska knjiga, Zagreb, 1998.;
- [8] Tehnička enciklopedija, Zagreb, 1992.;
- [9] Šavar, Š., Obrada odvajanjem čestica, I dio, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1977.;
- [10] <http://www.secotools.com> , katalog reznih alata, Secotools, 2007.;
- [11] Cebalo, R., Obrada odvajanjem čestica – obrađena pitanja i zadatci, Zagreb, 2000.;
- [12] Stanić, J., Teorija obrade metala I, Mašinski fakultet, Beograd, 1986.
- [13] Šavar, Š., Obrada odvajanjem čestica, II dio, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb 1977.
- [14] Zeren, E.; Özel, T., Hard turning technology, The State University of New Jersey, New Jersey, June 2002.
- [15] Škorić, S., Istraživanje pogodnosti obrade ortogonalnim okruglim glodanjem, Doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 2002.
- [16] D. P. Soroka: Hard Turning and the Machine Tool, Hardinge, New York, 2004.
- [17] F. Clocke; E. Brinksmeier; K. Weinert: Capability Profile of Hard Turning and Grinding Processes, Annals of the CIRP 2005.
- [18] Horvat, N., Obrada otvrdnutih materijala, Diplomski rad, FSB, Zagreb 2007.
- [19] <http://www.kistler.com>
- [20] <http://www.mitutoyo.de>
- [21] <http://www.iscar.com> , katalog reznih alata, Iscar, 2006
- [22] Balder, D., Obrada otvrdnutih materijala, Završni rad, FSB, Zagreb 2007.