

# Utjecaj geometrije svrdla i parametara obrade na trošenje oštrice pri bušenju kamena

---

Peček, Miljenko

Master's thesis / Diplomski rad

2015

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:048706>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-01**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Miljenko Peček**

Zagreb, godina 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Toma Udiljak, dipl. ing.

Student:

Miljenko Peček

Zagreb, godina 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Tomi Udiljaku koji mi je svojom pomoći i savjetima pomogao tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem asistentu mag. ing. Mihi Klaiću na korisnim savjetima i nesebičnoj pomoći u izradi ovog rada.

Na kraju bih se zahvalio roditeljima, prijateljima i kolegama koji su mi bili podrška u vrijeme pisanja ovog diplomskog rada i koji su bili uz mene za vrijeme studiranja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Miljenko Peček



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Miljenko Peček** Mat. br.: 0035184934

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ GEOMETRIJE SVRDLA I PARAMETARA OBRADE NA TROŠENJE OŠTRICE PRI BUŠENJU KAMENA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF DRILL GEOMETRY AND CUTTING DATA ON TOOL WEAR AT STONE DRILLING**

Opis zadatka:

Postupci obrade odvajanjem sve češće se primjenjuju i za obradu nehomogenih materijala kao što su biološka tkiva i kamen. Zbog specifične strukture takvih materijala, potrebno je provjeriti valjanost modela koji se koriste pri obradi homogenih materijala. S tim ciljem u Laboratoriju za alatne strojeve se provode sustavna istraživanja pri bušenju kosti i kamena.

U sklopu istraživanja bušenja kamena u radu je potrebno utvrditi parametre Taylorovog modela kojima se opisuje intenzitet trošenja oštrice reznoga alata u funkciji parametara obrade. Također je potrebno istražiti mogućnost procjene stupnja istrošenosti primijenjenih svrdala kao funkciju sila rezanja i struje motora. Eksperimentalni dio rada treba provesti na ispitnom postavu u Laboratoriju za alatne strojeve koristeći dva svrdla od različitog materijala i različite geometrije, pri tri različite vrijednosti posmične brzine i brzine rezanja. Eksperimente je potrebno provesti na tri različite vrste kamena.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datum obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Toma Udiljak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc.  Franjo Cajner

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD .....	1
2. TROŠENJE ALATA .....	4
2.1. Taylor-ov princip trošenja alata.....	5
2.2. Uzroci i mehanizmi trošenja.....	10
2.2.1. Abrazija .....	11
2.2.2. Adhezija .....	13
2.2.3. Oksidacija.....	15
2.2.4. Difuzija.....	16
2.3. Oblici trošenja.....	19
2.3.1. Trošenje stražnje površine .....	19
2.3.2. Kratersko trošenje alata .....	20
2.3.3. Zarežno trošenje.....	20
2.3.4. Toplinska napuknuća .....	21
2.3.5. Krzanje oštrice .....	21
2.3.6. Naljepak.....	22
3. BUŠENJE .....	23
3.1. Parametri bušenja .....	23
3.2. Svrđlo.....	24
3.3. Trošenje svrdla kod bušenja .....	25
4. SVOJSTVA KAMENA I NJIHOV UTJECAJ NA OBRADU .....	26
4.1. Trošenje alata kod obrade kamena .....	28
5. ALATI ZA OBRADU KAMENA.....	30
5.1. Dijamantni alati u obradi kamena.....	32
5.1.1. Suvremeni postupci proizvodnje dijamantnih alata.....	33
5.2. Mehanizmi trošenja dijamantnih alata.....	34
5.3. Obrada kamena tvrdim metalom .....	37

5.4.	Mehanizmi trošenja alata od tvrdog metala kod obrade kamena .....	39
5.5.	Utjecaj parametara obrade na sile i trošenje alata pri obradi kamena .....	43
6.	NADZOR OBRADNIH STROJEVA I PROCESA .....	46
6.1.	Direktne metode nadzora.....	48
6.2.	Indirektne metoda nadzora .....	48
6.3.	Mjerenje signala sila i momenata .....	49
6.4.	Mjerenje struje glavnih i posmičnih motora.....	50
6.5.	Sustav praćenja procesa obrade .....	51
6.6.	Senzori .....	52
6.7.	Senzori sila .....	54
6.8.	Obrada signala .....	57
7.	EKSPERIMENTALNI DIO .....	58
7.1.	Alat .....	58
7.2.	Postav za ispitivanje .....	59
7.3.	Mjerni sustav .....	60
7.4.	Parametri obrade.....	62
7.5.	Proces ispitivanja.....	62
7.6.	Trošenje svrdla "A1" .....	64
7.7.	Trošenja svrdla "A2" .....	71
7.8.	Sile rezanja i struje motora .....	76
7.8.1.	Sile i struje kod obrade sa svrdlom "A1" .....	76
7.8.2.	Sile i struje kod obrade sa svrdlom "A2" .....	80
7.9.	Utjecaj strukture kamena na sile i struje posmičnog motora.....	83
7.10.	Usporedba rezultata.....	86
8.	ZAKLJUČAK .....	89
	LITERATURA.....	90

## POPIS SLIKA

Slika 1. Primjeri različitih struktura kamena [1] .....	2
Slika 2. Vijek trajanja alata [2].....	5
Slika 3. Utjecaj tri različite brzine rezanja na trošenje stražnje površine [2].....	6
Slika 4. Odnos brzine rezanja i vijeka trajanja alata u prirodnom log mjerilu [2].....	7
Slika 5. Grafički prikaz Taylor-ove jednadžbe [3].....	7
Slika 6. Grafički prikaz Taylor-ove jednadžbe za postojanost definiranu duljinom puta [3] ....	9
Slika 7. Udjeli mehanizma trošenja u procesu trošenja [5].....	10
Slika 8. 1. faza abrazijskog trošenja [6] .....	11
Slika 9. 2. faza abrazijskog trošenja [6] .....	11
Slika 10. Mogući oblici abrazije: a)abrazija u dodiru dvaju tijela, b)abrazija u dodiru triju tijela [6] .....	12
Slika 11. Primjer abrazivnog trošenja oštrice alata [7] .....	13
Slika 12. 1. faza adhezije [6].....	13
Slika 13. 2. faza adhezije [6].....	14
Slika 14. 3. faza adhezije [6].....	14
Slika 15. Primjer adhezijskog trošenja oštrice alata [7] .....	14
Slika 16. Supstitucijski mehanizam kretanja atoma [11] .....	16
Slika 17. Intersticijski mehanizam kretanja atoma [11].....	17
Slika 18. Mehanizmi trošenja na alatu tijekom obrade [5].....	17
Slika 19. Temperature u zoni obrade [5].....	18
Slika 20. Trošenje stražnje površine alata [5] .....	19
Slika 21. Kratersko trošenje alata [5] .....	20
Slika 22. Zarezno trošenje alata [5].....	20
Slika 23. Toplinska napuknuća na alatu [1] .....	21
Slika 24. Krzanje oštrice alata [1] .....	21
Slika 25. Naljepak na oštrici alata [5] .....	22
Slika 26. Prikaz spiralnog svrdla [4] .....	24
Slika 27. Raspored tvrdoće granita: odnos tvrdoće i različitih mjesta ispitivanja i prosječni tvrdoća [17] .....	27
Slika 28. Prikaz različitih alata za obradu kamena s dijamantnim zrnima [7] .....	31
Slika 29. Prikaz dijamantnog zrna i kobaltne matrice [21] .....	32
Slika 30. Proces stvaranja odvojene čestice kod obrade kamena s dijamantnim alatom [22] .	33
Slika 31. Trošenje dijamantnog zrna [21] .....	35
Slika 32. Tipična mikrostruktura WC-Co tvrdog metala [27] .....	37
Slika 33. Primjeri trošenja tvrdog metala kod obrade kamena [27].....	38
Slika 34. Uklonjena vezivna faza abrazijskim trošenjem [27].....	39
Slika 35. Pukotine na zrnima WC-a [29] .....	40
Slika 36. Pukotine zbog toplinskog naprezanja [7].....	41
Slika 37. Svojstva ispitivanih kamena i alata od tvrdog metala [28] .....	41
Slika 38. Usporedba volumena trošenja alata kod obrade različitih kamena [28] .....	42
Slika 39. Odnos kraterskog trošenja, različitih tvrdoća kamena i dubine bušenja [19] .....	44
Slika 40. Odnos tvrdoće kamena i aksijalne sile (a) odnosno momenta (b) [31].....	45



Slika 41. Elementi nadzornog sustava [34].....	47
Slika 42. Mogućnosti nadzora obrade s više senzorskim sustavom [39].....	53
Slika 43. Piezoelektrični efekt kristala kvarca .....	55
Slika 44. Primjeri višekomponentnih senzora sila: a) statički senzor sile (KISTLER type 9257B) b) rotacijski senzor sile (KISTLER type 9125A) [40].....	56
Slika 45. Primjer toka i obrade signala iz senzora sila [40].....	57
Slika 46. Troosna numerički upravljana glodalice. (1) Motor za glavno gibanje; (2) Svrdo; (3) Obradak; (4) Kamera; (5) Senzor sila .....	59
Slika 47. Senzor sile 9257B .....	60
Slika 48. Nabojno pojačalo 5017B.....	60
Slika 49. Prikaz podataka mjerenja i određivanje parametara obrade .....	61
Slika 50. Pozicija alata za snimanje oštrice.....	61
Slika 51. Oštrica "1"(lijevo) i oštrica "2" (desno) alata "A1" prije početka bušenja .....	64
Slika 52. Trošenje uzduž oštrice "1", svrdla "A1".....	65
Slika 53. Trošenje oštrice "1"svrdla "A1" u odnosu na dulju puta u posmičnom smjeru.....	66
Slika 54. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "1" svrdla "A1" nakon 189 (lijevo) i nakon 1189 (desno) izbušenih provrta .....	67
Slika 55. Istrošenost rezne oštrice i stražnje površine "1" svrdla "A1" nakon 1378 izbušenih provrta .....	68
Slika 56. Trošenje uzduž oštrice "2", svrdla "A1".....	69
Slika 57. Trošenje oštrice "2"svrdla "A1" u odnosu na duljinu puta u posmičnom smjeru.....	69
Slika 58. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "2" svrdla "A1" nakon 189 (lijevo) i nakon 1189 (desno) izbušenih provrta .....	70
Slika 59. Istrošenost rezne oštrice i stražnje površine "2" svrdla "A1" nakon 1378 izbušenih provrta .....	70
Slika 60. Oštrica "1"(lijevo) i oštrica "2" (desno) alata "A2" prije početka bušenja .....	71
Slika 61. Trošenje uzduž oštrice "1", svrdla "A2".....	72
Slika 62. Trošenje oštrice "1" svrdla "A2" u odnosu na duljinu puta u posmičnom smjeru.....	72
Slika 63. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "1" svrdla "A2" nakon 189 (lijevo) i nakon 1189 (desno) izbušenih provrta .....	73
Slika 64. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "1" svrdla "A2" nakon 1378 izbušenih provrta .....	73
Slika 65. Trošenje uzduž oštrice "2", svrdla "A2".....	74
Slika 66. Trošenje oštrice "2" svrdla "A2" u odnosu na duljinu puta u posmičnom smjeru.....	75
Slika 67. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "2" svrdla "A2" nakon 189 (lijevo) i nakon 1189 (desno) izbušenih provrta .....	75
Slika 68. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "2" svrdla "A2" nakon 1378 izbušenih provrta .....	76
Slika 69. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na posmičnu silu kod svrdla "A1" 77	
Slika 70. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na struju posmičnog motora kod svrdla "A1".....	78
Slika 71. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na struju motora glavnog vretena kod svrdla "A1".....	79
Slika 72. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na posmičnu silu kod svrdla "A2" 80	

Slika 73. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na struju posmičnog motora kod svrdla "A2".....	81
Slika 74. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na struju motora glavnog vretena kod svrdla "A2".....	82
Slika 75. Odnos utjecaja različitih kamena na posmičnu silu za alat "A1".....	83
Slika 76. Odnos utjecaja različitih kamena na struju posmičnog motora za alat "A1".....	84
Slika 77. Odnos utjecaja različitih kamena na posmičnu silu za alat "A2".....	85
Slika 78. Odnos utjecaja različitih kamena na struju posmičnog motora za alat "A2".....	85
Slika 75. Usporedba oštrice "2" alata "A1"(lijevo) i alata "A2" (desno).....	86
Slika 76. Usporedba trošenja oštrice "2" alata "A1" i alata "A2".....	87
Slika 77. Usporedba posmičnih sila svrdla "A1" (lijevo) i svrdla "A2" (desno).....	88
Slika 78. Usporedba struja posmičnog motora kod svrdla "A1" (lijevo) i svrdla "A2" (desno).....	88

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Parametri obrade

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$v_c$	m/min	brzina rezanja
$v_f$	mm/min	posmična brzina
$T$	min	vijek trajanja alata
$m$	-	eksponent postojanosti
$C_T$	-	Taylor-ova konstanta
$n$	min <sup>-1</sup>	broj okretaja
$D$	mm	promjer alata
$L_f$	m	duljina bušenja u smjeru posmičnog gibanja
$m_f$	-	Taylor-ov eksponent
$C_{L_f}$	-	Taylor-ova konstanta
$F_N$	N	normalna komponenta opterećenja kod abrazije
$F_T$	N	tangencijalna komponenta opterećenja kod abrazije
$f$	mm/okr	posmak
$2\varphi$	°	vršni kut svrdla
$F_{grt}$	N	tangencijalna sila na dijamantno zrno
$F_{grn}$	N	normalna sila na dijamantno zrno
$Q$	C	količina naboja
$d$	-	konstanta kristala
$F$	N	primijenjena sila na kristal
$F_Z$	N	sila na alat u posmičnom smjeru
$I_Z$	A	struja motora za ostvarivanje posmičnog gibanja
$I_S$	A	struja motora glavnog vretena
$K1$	-	kamen 1
$K2$	-	kamen 2
$K3$	-	kamen 3
$S1$	-	stupanj istrošenosti 1
$S2$	-	stupanj istrošenosti 2
$A1$	-	Svrdlo 1
$A1$	-	Svrdlo 2

## SAŽETAK

Kada se ispituje trošenje alata postoji niz modela trošenja koji se uglavnom primjenjuju kod obrade metalnih materijala, ali ima mali broj onih za procjenu trošenja nehomogenih materijala, kao što je primjerice kamen .

U teorijskom dijelu ovog rada biti će prikazani osnovni uzroci i mehanizmi trošenja alata, kao i oblici trošenja alata koji se mogu pojaviti zbog različitih uvjeta u kojima se nalazi alat tijekom obrade. Opisat će se Taylor-ov model trošenja i prikazati utjecaj različitih parametara obrade na trošenje alata. Kako će se u eksperimentalnom dijelu obrađivati kamen, u teorijskom dijelu će još biti obrađen utjecaj različitih materijala na trošenje alata, koji se koriste za obradu kamena. Detaljno će biti opisani postupci trošenja takvih alata, odnosno uvid u strukturu alata i procese koji se zbivaju tijekom obrade. Praćenje istrošenosti alata je veoma važno zbog pravovremene i brze reakcije s kojom se čuva alat, a time i kvaliteta proizvoda.

U eksperimentalnom dijelu provodit će se bušenje kamena te će se pratiti utjecaj istrošenosti alata na vrijednosti posmične sile te vrijednosti struja glavnog i posmičnog motora. Nakon bušenja određenog broj provrta oštrice, svrdla će se slikati te će se procijeniti stupanj istrošenosti i usporediti iznos trošenja s izbušenom duljinom, kao i promjena sila i struje glavnog motora u odnosu na istrošenost alata.

Ključne riječi: svrdlo, kamen, trošenje, bušenje

## **SUMMARY**

In examination of tool wear there is a lot of models that concern tool wear at cutting metallic materials but little number of those which concern evaluation of wear when cutting heterogeneous materials, for example a stone.

In first part of this paper there will be shown basic causes and mechanism of tool wear, and also different types of tool wear that can appear due to different cutting conditions during cutting process. Taylor model of tool wear and influence of different process parameters on tool will be described. Because stone material will be used in experimental part of this paper, an influence of different materials on tool wear, which are commonly used in stone machining, will be shown. Detailed view of tool wear and processes which happen during machining will be presented. Tool wear monitoring is very important due to timely and quick response which helps to save the quality of the product.

In the experiment section a drilling of stone material will be conducted and force and current of main spindle and feed motor will be monitored. After certain number of drilled holes tool cutting edges, using special camera, will be photographed and they will be used to evaluate a degree of tool wear and compare it to overall drilling length, with comparison to respective changes of force applied on tool and main spindle motor current.

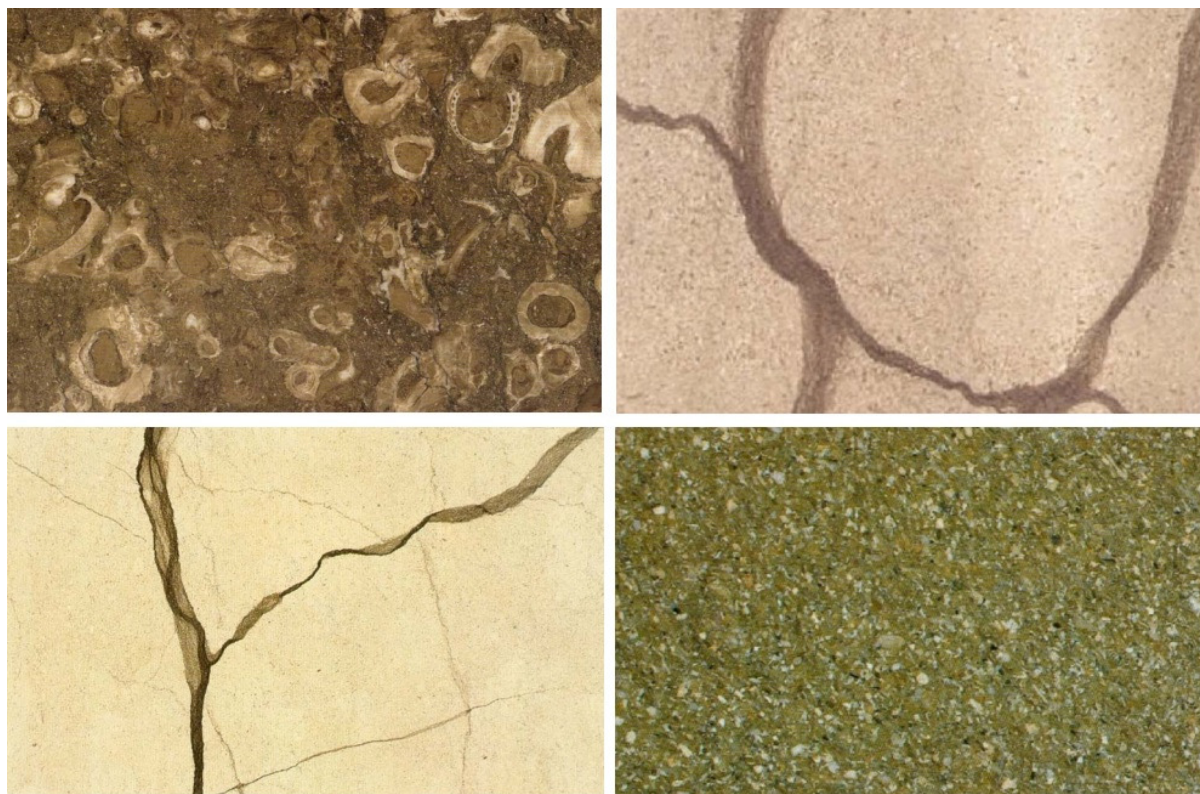
Keywords: drill bit, stone, wear, drilling

## 1. UVOD

Iako se najveći udio u postupcima obrade odvajanjem odnosi na obradu metalnih materijala, obrada nehomogenih materijala, kao što su kamen i biološka tkiva, se također počinje sve više primjenjivati, potičući tako istraživanja i razvoj tehnologije obrade nehomogenih materijala. Najveći problem u obradi nehomogenih materijala leži upravo u njihovoj specifičnoj strukturi odnosno u postojanju dijelova strukture različitih svojstava koji različito utječu na trošenje alata i na sam proces obrade. Zbog specifičnih karakteristika nehomogenih materijala modeli trošenja alata koji se koriste kod obrade homogenih materijala nisu nužno valjani kod primjerice obrade kamena.

Kao jedno od važnijih prirodnih sirovina kamen se od ranih početaka koristio u svakodnevici ljudskog života omogućavajući preživljavanje i zaštitu ljudskog života. Kao oružje omogućio je čovjeku nabavu hrane, a kao građevni materijal zaštitu od atmosferskih uvjeta ili opasnih životinja. Kamen je činio vrlo efikasno oruđe za obradu drugih materijala te je kao takav mogao biti karakteriziran i kao prvotni alat u užem smislu. S razvojem ljudskog života kamen se počinje upotrebljavati i u raznim kulturnim svrhama, odnosno stvaraju se razne građevine, kipovi, skulpture i spomenici.

Kamen je materijal koji se najčešće koristi u arhitekturi i obnavljanju spomenika. Takav materijal ima heterogenu strukturu, koja je rezultat različitih sedimentarnih slojeva, veličina zrna, a isto tako i raznih mikro i makro pukotina unutar samog kamena. Zbog takvih svojstava otežano je određivanje tvrdoće korištenjem standardnih tehnika mjerenja kao što su Vickers, Brinell, Rockwell i slične metode. Nadalje takva mjerenja tvrdoće daju podatak o tvrdoći površine, no ne i o tvrdoći unutarnjeg dijela materijala. Poznavanje određenih svojstava kamena vrlo je važno zbog utjecaja tih svojstava na samu primjenu kamena. Područja primjene kamena zahtijevaju visoku tlačnu čvrstoću, čvrstoću na savijanje, otpornost na trošenje, postojanost na atmosferske utjecaje te otpornost na različite kemikalije. Kada se ispituju svojstva kamena treba se odrediti i petrografske karakteristike kamena, unutar koje postoje varijante kamena s različitim mehaničkim, fizičkim i uporabnim svojstvima [1].



**Slika 1. Primjeri različitih struktura kamena [1]**

Opisane karakteristike stvaraju određene složene probleme prilikom strojne obrade kamena. Cilj svake obrade je ostvariti prihvatljiv omjer između životnog vijeka alata te ekonomskih i tehnoloških parametara obrade. Optimalno rješenje može se jedino pronaći ako se dobro poznaju detalji procesa obrade i faktori koji utječu na proces obrade. Najznačajniji parametri koji utječu na proces obrade kamena su: struktura kamena, odnosno tvrdoća i čvrstoća, materijal reznog alata i njegove karakteristike te parametri obrade kao što su brzina rezanja, posmak, dubina rezanja i primjena hlađenja. Od velike važnosti je i razumijevanje mehanizama trošenja odnosno međudjelovanje kamena i alata prilikom procesa obrade.

Iako tehnologija obrade odvajanjem čestica svakodnevno napreduje, još uvijek postoje određeni problemi koji sprečavaju potpunu automatiziranost procesa, a time i višestruko povećanje produktivnosti. Najčešći takvi problemi su trošenja i puknuća reznih alata. Trošenje alata je rezultat mehaničkih i kemijskih interakcija između rezne oštrice i obratka kod kojeg dolazi do uklanjanja određenog udjela materijala s rezne oštrice odnosno alata. Priroda mehanizama trošenja je vrlo složena i ovisi o mnogo parametara te ju je vrlo teško opisati jednostavnim jednadžbama i modelima. Iako je cijena zamjene alata relativno niska u odnosu na proizvodnju dijelova loše kvalitete ili čak škarta, ipak je potrebno uložiti dragocjeno



vrijeme u taj proces zamjene što rezultira većim potrebnim vremenom za plasman proizvoda na tržište, a samim time i manjom konkurentnošću na tržištu. Zbog toga se sve više razvijaju različiti oblici nadzora trošenja alata s kojima bi se omogućio uvid u trenutno stanje alata te se reagiralo po potrebi.

Tehnologija praćenja istrošenosti i detekcije loma alata dolazi do izražaja u suvremenoj obradi s CNC strojevima gdje je moguće realizirati brzu reakciju na pretjeranu istrošenost alata jednostavnim korigiranjem parametara procesa. Ovakvim sustavom omogućava se razvijanje višeg stupanja automatizacije procesa. Takav automatizirani sustav bio bi u mogućnosti spriječiti prebrzo trošenje alata, a time i ubrzati vrijeme obrade odabirom idealnih parametara procesa. Takav sustav uvelike bi umanjio postotak škarta i povećao produktivnost uz maksimalno produljenje životnog vijeka alata. Samim time omogućila bi se brža realizacija proizvoda za tržište uz zadovoljavajuću ili čak i bolju kvalitetu izrade.

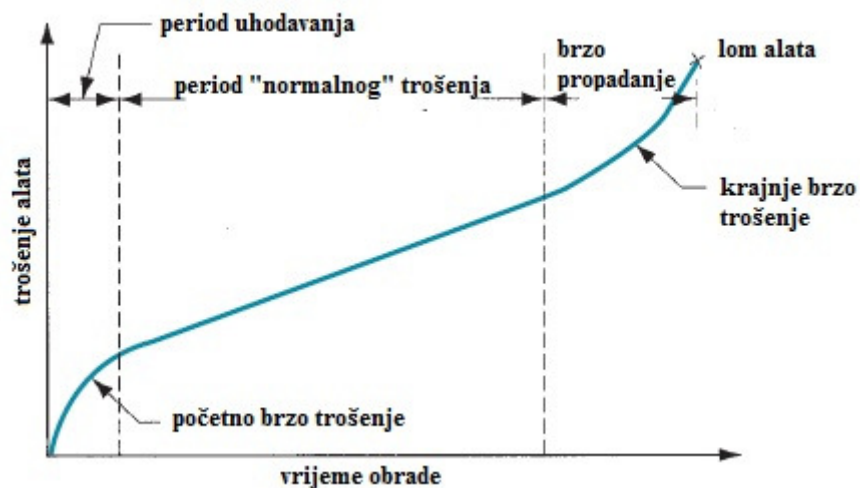
## 2. TROŠENJE ALATA

Rezni alati su tijekom obrade izloženi velikim silama i udarcima, a samim time i toplinskim i mehaničkim naprezanjima. Sposobnost alata da ostane čim duže u zahvatu s materijalom od velike je važnosti u današnje vrijeme u kojem se zahtjeva što brža, točnija obrada i što manje vrijeme proizvodnje. Trošenje alata također uvelike utječe na točnost obrade pa je bitno na vrijeme prepoznati i odrediti stupanj istrošenosti alata, koji bi mogao prouzročiti nepravilnosti tijekom obrade, kako bi se spriječila daljnja obrada koja bi rezultirala škartom.

Zbog izrazito promjenjivih uvjeta tijekom obrade vrlo je teško odrediti trenutni stupanj oštećenja, odnosno istrošenosti alata. Do promjenjivih uvjeta dolazi zbog različitih brzina i dubina rezanja, različitih tvrdoća materijala, nepravilnosti unutar mikrostrukture obrađivanog materijala, razvoju topline, odnosno izvedbi hlađenja i odvođenja odvojene čestice. Problemi koji se javljaju zbog trošenja alata uzrokuju kašnjenja u proizvodnji zbog zamjene alata ili smanjivanja brzine obrade, a sve to se očituje u vremenima proizvodnje i plasiranju proizvoda na tržište. Stoga treba djelovati preventivno na trošenje alata odnosno potreban je nadzor trošenja alata kako bi se u što kraćem vremenskom roku spriječila pojava oštećenja ili čak puknuća alata zbog prekomjernog trošenja.

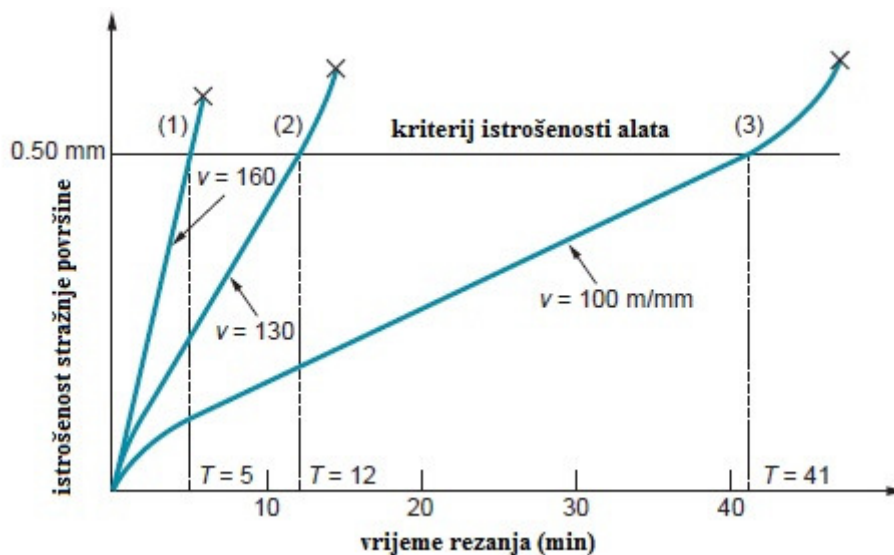
## 2.1. Taylor-ov princip trošenja alata

S odmicanjem vremena obrade različiti mehanizmi uzrokuju povećanje stupnja istrošenosti alata. Osnovna povezanost između trošenja alata i vremena obrade može se vidjeti na slici 2. Ovaj način usporedbe može se koristiti i za različite vrste trošenja alata kao što su trošenje prednje površine, trošenje stražnje površine ili bilo koje drugo trošenje koje uzrokuje promjenu dimenzija i oblika alata. Proces trošenja može se podijeliti u tri ne jednakomjerna perioda trošenja. Prvi period trošenja, ili period uhadavanja, označava vrijeme u kojem se novi alat počinje brzo trošiti do određenog iznosa intenziteta istrošenosti kojega je moguće definirati kao normalnu istrošenost alata. U tom trenutku počinje drugi period ili period normalnog trošenja koji traje duže vrijeme i u kojem se istrošenost alata ne mijenja u mjeri da bi moglo doći do velikih dimenzijskih nepravilnosti alata ili obratka. Nakon dužeg vremena obrade, istrošenost alata dostiže kritičnu vrijednost nakon koje počinje drastično povećanje trošenja. To područje označava početak brzog propadanja alata. U tom području dolazi do povećanja temperatura prilikom obrade, sila i momenata što naposljetku može dovesti do loma alata. U zadnjem periodu, promjene u dimenzijama i obliku alata su najviše izražene pa to dovodi do netočnosti obrade. Zbog toga je potrebno promijeniti alat nakon što se primijeti da je istrošenost dostigla zadnji period [2].



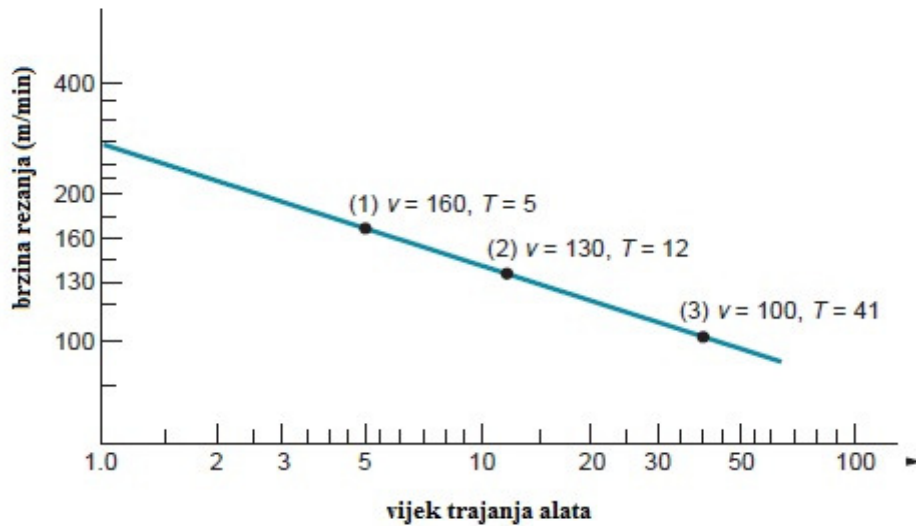
Slika 2. Vijek trajanja alata [2]

Različiti nagibi krivulja trošenja u pojedinim periodima ovise o obrađivanom materijalu i parametrima obrade. Materijali koji su teže obradivi uzrokuju brže povećanje istrošenosti alata odnosno veći nagib krivulje. Povećana brzina rezanja, posmak i dubina rezanja također imaju određeni učinak na krivulju trošenja. Na povećanje trošenja najvećim dijelom utječe povećanje brzine rezanja, a tek manjim dijelom povećanje posmaka i dubine rezanja koji su karakteristični za povećanje sile rezanja i posmičnih sila. Usporedba krivulja trošenja s različitim brzinama rezanja se može vidjeti na slici 3. Može se primijetiti da s porastom brzine rezanja raste i intenzitet trošenja pa se tako isti iznos trošenja postiže u kraćem vremenu. Vijek trajanja alata može se definirati kao potrebno vrijeme rezanja u kojem se alat može koristiti do trenutka pojave prevelikog stadija istrošenosti ili loma. U stvarnosti se alat vrlo rijetko koristi do tog trenutka zbog prevelikog utjecaja na točnost dimenzija obrade, kvalitetu obrade i nemogućnosti ponovnog oštrenja alata. Kao alternativa tome može se koristiti određeni stupanj istrošenosti, definiran razinom istrošenosti kao na primjer vrijednost istrošenosti stražnje površine od 0,5 mm, što je prikazano na slici 3. horizontalnom crtom. Kada krivulje trošenja dođu do te linije to se može prikazati kao završetak vijeka trajanja alata. Projekcijom točke, u kojoj se te dvije krivulje sijeku, na vremensku os može se definirati vijek trajanja alata u tom slučaju.



Slika 3. Utjecaj tri različite brzine rezanja na trošenje stražnje površine [2]

Kada bi se tri krivulje trošenja sa slike 3. crtale u prirodnom logaritamskom mjerilu i prikazale kao odnos brzine rezanja i vijeka trajanja alata dobio bi se pravac prikazan na slici 4.



Slika 4. Odnos brzine rezanja i vijeka trajanja alata u prirodnom log mjerilu [2]

Otkriće ovog odnosa može se pripisati F.W. Taylor-u, te se taj odnos može izraziti i pomoću formule, odnosno skraćenog oblika Taylor-ove jednačbe koja glasi:

$$v_c \cdot T^m = C_T \quad (1)$$

gdje je:

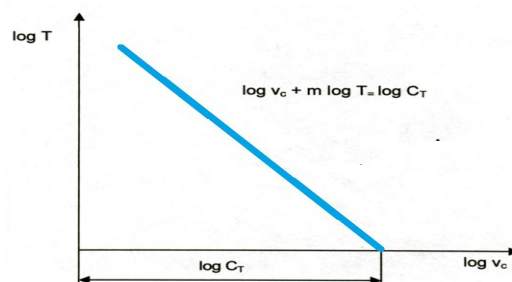
$v_c$  - brzina rezanja, m/min

$T$  – vijek trajanja alata, min

$m$  – eksponent postojanosti

$C_T$  – Taylorova konstanta (ovisi o materijalu obratka i alata, posmaku i dubini rezanja)

Fizikalni smisao konstante  $C_T$  je da predstavlja brzinu pri kojoj bi postojanost alata iznosila jednu minutu, odnosno jednu vremensku jedinicu. Grafički prikaz te konstante može se vidjeti na slici 5.



Slika 5. Grafički prikaz Taylor-ove jednačbe [3]

Postoje tri mogućnosti definiranja postojanosti oštrice alata:

1. Postojanost definirana vremenom koje alat može provesti u obradi prije nego dođe do stupnja istrošenosti koje je definirano kao dozvoljena istrošenost alata (kriterijsko trošenje) [3].
2. Postojanost definirana duljinom puta u smjeru glavnog gibanja. Ovakav način definiranja postojanosti ima prioritet kod postupka provlačenja, dok kod drugih postupaka obrade odvajanjem uglavnom nije u primjeni [3].
3. Postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja. Ovakav način definiranja postojanosti ima prioritet kod postupka bušenja (posebno kod bušnih slika), a može naći primjenu i kod većine drugih postupaka obrade odvajanjem (sve više u primjeni) [3].

Osnovni oblik Taylor-ove jednadžbe (1) predstavlja postojanost oštrice definiranu vremenom koje alat može provesti u obradi. Iz jednadžbe se može vidjeti kako povećanje brzine rezanja uzrokuje smanjenje vijeka trajanja alata.

Za definiranje postojanosti alata sve više se koristi postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja. Taj postupak se najviše primjenjuje kod bušenja jer sami parametri bušenja i način gibanja alata uvelike pomažu kod određivanja prijednog puta. Kod ovog postupka se kao mjerilo vijeka trajanja svrdla ne uzima vrijeme, već put  $L$ . Postupak određivanja jednadžbe za ovakav način definiranja postojanosti glasi [3]:

$$L_f = v_f \cdot T \quad (2.1)$$

$$v_f = f \cdot n \quad (2.2)$$

$$n = \frac{v_c}{D \cdot \pi} \quad (2.3)$$

Iz (2.1), (2.2), (2.3) dobije se:

$$T = L_f \cdot \frac{D \cdot \pi}{v_c \cdot f} \quad (2.4)$$

$$v_c \cdot \left( L_f \cdot \frac{D \cdot \pi}{v_c \cdot f} \right)^m = C_T \quad (2.5)$$

$$v_c^{1-m} \cdot L_f^m = C_T \left( \frac{f}{D \cdot \pi} \right)^m \quad (2.6)$$

$$C_T \frac{1}{1-m} \left( \frac{f}{D \cdot \pi} \right)^{\frac{m}{1-m}} = C_{L_f} \quad (2.7)$$

$$\text{Usvajanjem: } \frac{m}{1-m} = m_f \quad (2.8)$$

Dobivamo:

$$v_c \cdot L_f^{m_f} = C_{L_f} \quad (2.9)$$

gdje je:

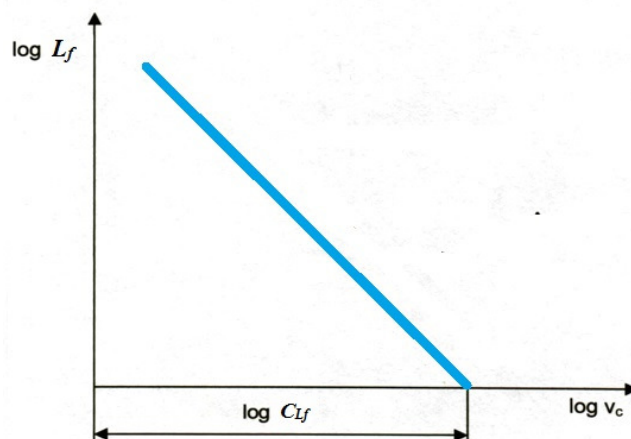
$v_c$  – brzina rezanja, m/min

$L_f$  – duljina bušenja u smjeru posmičnog gibanja, m

$m_f$  - Taylor-ov eksponent

$C_{L_f}$  - Taylor-ova konstanta

Fizikalni smisao konstante  $C_{L_f}$  je brzina rezanja pri kojoj bi postojanost alata iznosila jedan metar puta u smjeru posmičnoga gibanja. Ova jednadžba je slična Taylor-ovoj jednadžbi za trajanje rezne oštrice kod drugih konvencionalnih metoda, ali su vrijednosti konstanti  $m$  i  $C_L$  različite. Na taj način umjesto zavisnosti  $t-v_c$  kao kod na primjer tokarenja, dobijemo zavisnost  $L-v_c$ . Na temelju eksperimentalnih mjerenja došlo se do zaključka da konstanta  $m_f$  poprima vrijednost između 0,125 i 0,45 ovisno o materijalu obratka [4]. Na slici 6. može se vidjeti grafički prikaz Taylor-ove konstante.

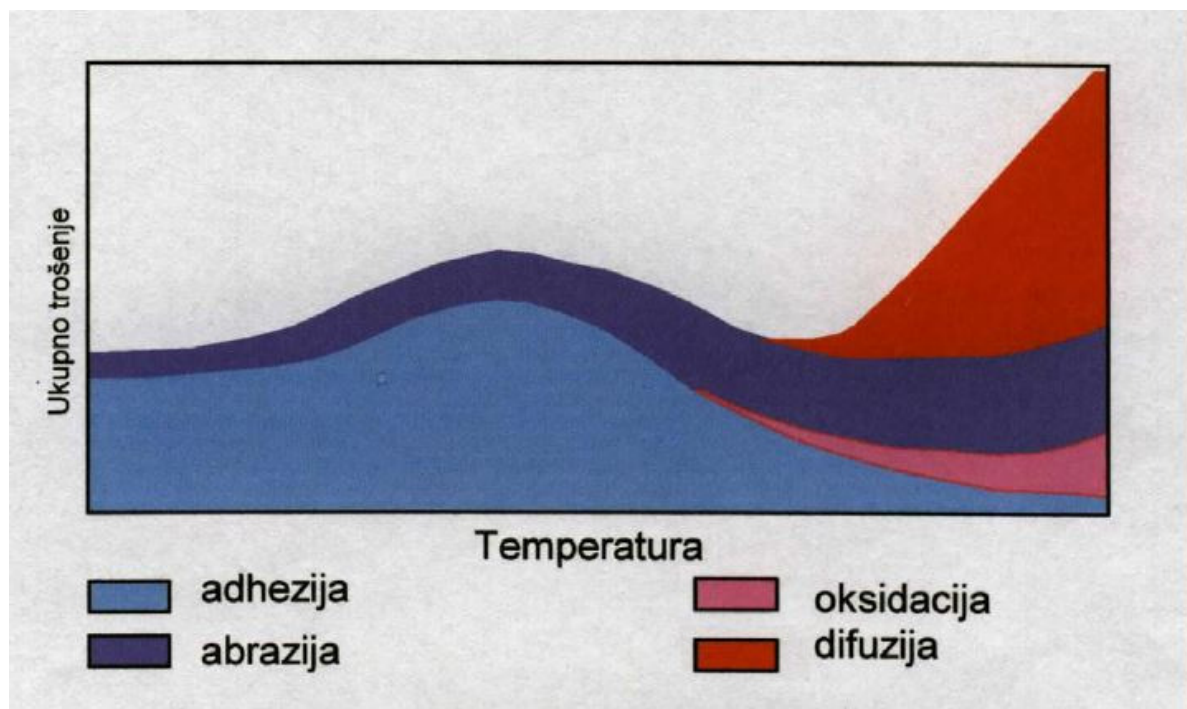


Slika 6. Grafički prikaz Taylor-ove jednadžbe za postojanost definiranu duljinom puta [3]

## 2.2. Uzroci i mehanizmi trošenja

Prilikom kontakta s površinom drugog materijala rezni alati su izloženi veoma visokim iznosima trenja tj. veoma visokim iznosima sila i toplini koja proizlazi iz toga. Zbog toga je nemoguće izbjeći trošenje alata. Trošenje alata se očituje kao gubitak materijala na samom alatu te promjena oblika alata što rezultira promjenom i samog oblika obrađivanog proizvoda odnosno točnosti. Osim mehaničkim i toplinskim naprezanjima rezni alat je također izložen i kemijskim djelovanjima.

Uzroci trošenja odnosno mehanička, toplinska i kemijska naprezanja uzrokuju različite mehanizme trošenja odnosno razvijanje triboloških procesa na reznom dijelu alata. Mehanizmi trošenja su abrazija, difuzija, oksidacija, zamor materijala i adhezija. Udjeli mehanizama trošenja u samom procesu trošenja nisu uvijek isti te ovise o čimbenicima kao što su: vrsta obrađivanog materijala, materijal i oblik alata. Na slici 7. se može vidjeti ovisnost određenih mehanizama trošenja o temperaturi.



Slika 7. Udjeli mehanizma trošenja u procesu trošenja [5]

Navedeni mehanizmi trošenja mogu se podijeliti u dvije skupine:

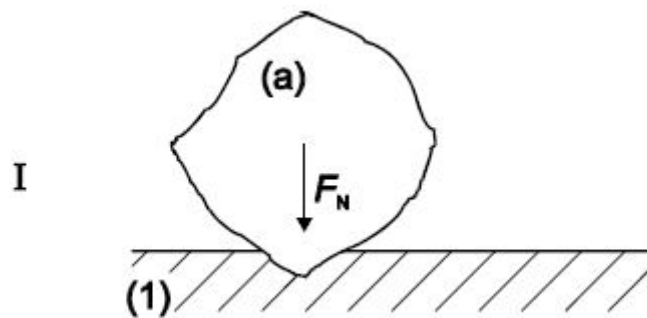
- Mehanizmi koji su posljedica mehaničkog opterećenja: abrazija i adhezija
- Mehanizmi koji su posljedica kemijskog djelovanja između alata, obratka i okoline: oksidacija i difuzija



Iz slike 7. se može vidjeti kako na nižim temperaturama prevladava adhezija uz abraziju te su to jedini mehanizmi trošenja pri nižim temperaturama. S porastom temperature počinju se pojavljivati oksidacija i difuzija te utjecaj adhezije odnosno abrazije opada u odnosu na kemijske procese oksidacije i difuzije.

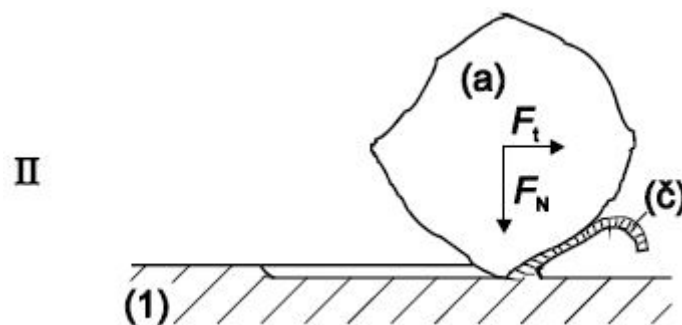
### 2.2.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao posljedica prodiranja tvrdog materijala u površinske slojeve mekšeg materijala uz brazdanje pri uzajamnom gibanju tijela. Događaj abrazije može se prikazati u dvije faze. U prvoj fazi abraziv prodire u površinu materijala pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$  [6].



Slika 8. 1. faza abrazijskog trošenja [6]

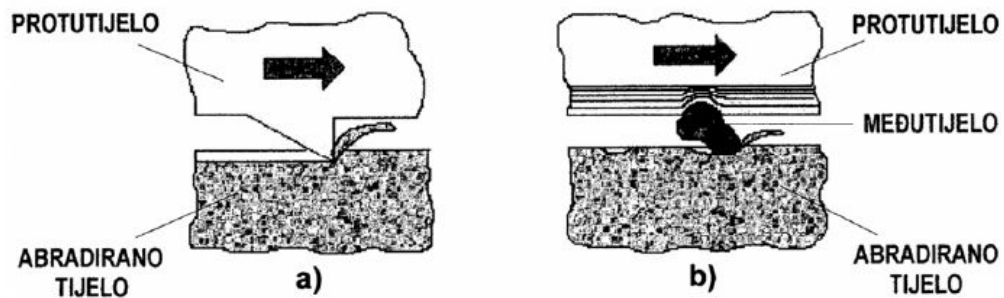
U drugoj fazi dolazi do istiskivanja materijala u obliku čestica (oznaka č na slici 9) trošenja pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja.



Slika 9. 2. faza abrazijskog trošenja [6]

Ovisno o strukturi abrazija se može pojaviti u dva oblika:

- Abrazija u dodiru dvaju tijela
- Abrazija u dodiru triju tijela



Slika 10. Mogući oblici abrazije: a) abrazija u dodiru dvaju tijela, b) abrazija u dodiru triju tijela [6]

Kod abrazije u dodiru dvaju tijela imamo dva funkcionalna dijela, abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo. Kod abrazije u dodiru triju tijela imamo dva funkcionalna dijela, abrazivno tijelo i protutijelo te međutijelo, a to su čestice koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski [6].

Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine abrazija može biti:

- Mikrobrazdanje
- Mikrorezanje
- Mikronaprsnuća
- Mikroumor

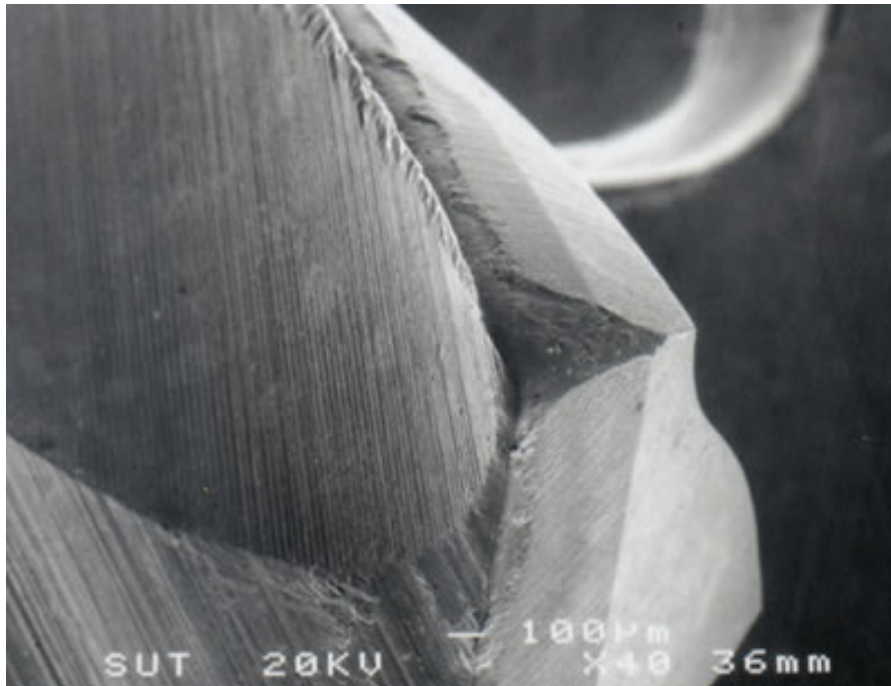
Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri praktična slučaja:

- Čista abrazija
- Selektivna abrazija
- Nulta abrazija

Otpornost na fazu mehanizma abrazije (prodiranje abraziva u površinu materijala) određena je s više utjecajnih čimbenika, a najznačajniji je međusobni omjer mikrotvrdoće abraziva i materijala trošene površine.

Otpornost na II. fazu mehanizma abrazije najutjecajniji čimbenik je način napredovanja pukotine koji općenito može biti:

- duktilni
- krhki
- umor (površine)

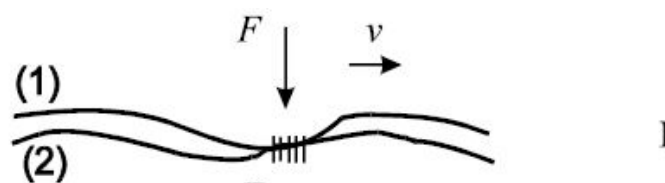


Slika 11. Primjer abrazivnog trošenja oštrice alata [7]

### 2.2.2. Adhezija

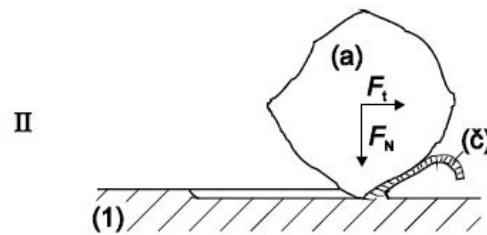
Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza [6]. Adhezija je posljedica djelovanja međuatomskih/međumolekulskih sila u točkama dodira tijela i formiranje mikrozavara, koji se raskidaju pri uzajamnom gibanju tijela uz "preraspodjelu materijala".

Kao i abrazija, proces adhezije se može opisati u više faza. U prvoj fazi dolazi do nastajanja adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestima dodira izbočina.



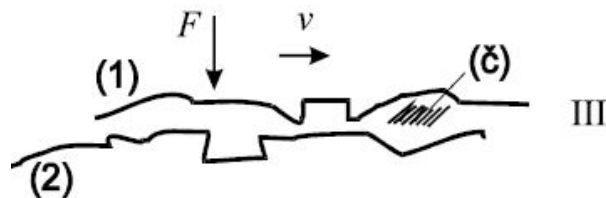
Slika 12. 1. faza adhezije [6]

U drugoj fazi adhezije dolazi do raskidanja adhezijskog sloja, a čestica trošenja ostaje spontano „nalijepljena“ na jednom članu kliznog para.



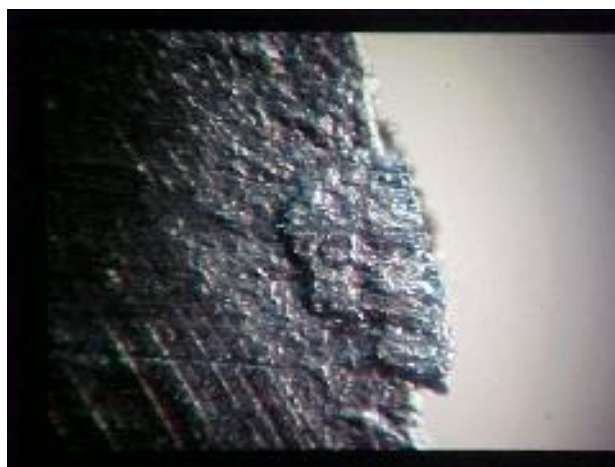
Slika 13. 2. faza adhezije [6]

U trećoj fazi adhezije dolazi do otkidanja čestice (eventualno). Oblik čestica ovisi o uvjetima, a uglavnom je listićast.



Slika 14. 3. faza adhezije [6]

Otpornost na adhezijsko trošenje ovisi o sklonosti stvaranju mikrozavarenih spojeva kliznog para i jakosti uspostavljenih adhezijskih veza. Osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara je njihova tribološka kompatibilnost. Tribološka kompatibilnost je prikladnost za rad u kliznom paru i bolja je za materijale koji nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru. Suprotna je metalurškoj kompatibilnosti tj. uzajamnoj topljivosti metala u krutom stanju [6].



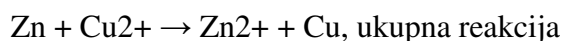
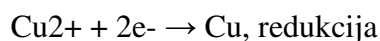
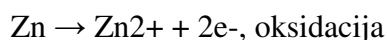
Slika 15. Primjer adhezijskog trošenja oštrice alata [7]

### 2.2.3. Oksidacija

Oksidacija i redukcija su kemijske reakcije pri kojima tvar što se oksidira otpušta elektrone, a tvar koja se reducira prima elektrone [8].

Prvotno se oksidacijom nazivalo spajanje nekog elementa s kisikom (npr. hrdanje željeza, izgaranje ugljena), a redukcijom oduzimanje kisika (npr. pri dobivanju kovina iz njihovih oksida). Poslije se značenje tih pojmova proširilo tako što se pod oksidacijom razumijevalo i oduzimanje vodika (npr. pri prevođenju alkohola u aldehid), a pod redukcijom i primanje vodika (npr. prevođenje sumpora u sumporovodik). Danas se u kemijskom smislu oksidacijom naziva otpuštanje, a redukcijom primanje negativnog električnog naboja. Te pojave se ostvaruju prijelazom valentnih elektrona s atoma, iona ili molekula druge tvari (redukcija), bilo izravno, bilo na elektrodama galvanskoga članka ili elektrolitske ćelije. Prema tome, kisik i vodik ne moraju uopće biti sudionici tih reakcija. Takve se reakcije nazivaju oksidoredukcijskim reakcijama ili skraćeno redoks reakcijama. Spojevi koji lako podliježu oksidaciji nazivaju se reducirajućim agensima [8].

Te su dvije reakcije nužno povezane i uvijek se zbivaju istodobno, npr. [8]:



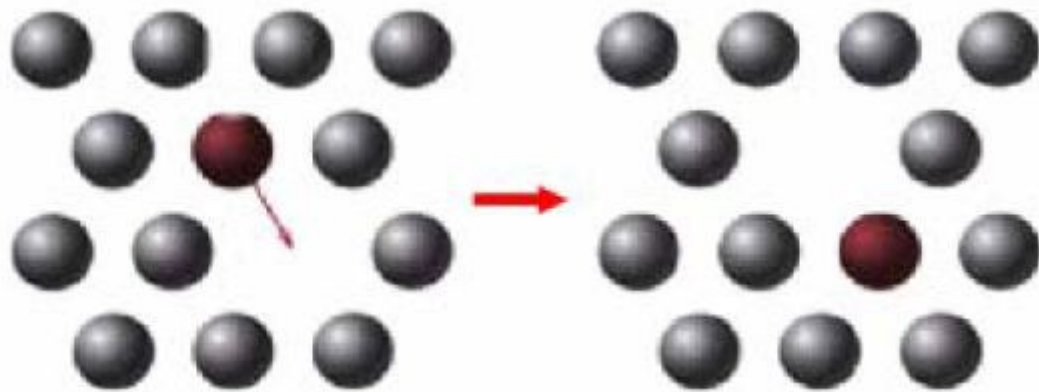
Oksidacija je izravna kemijska reakcija između metala i kisika iz atmosfere. Različiti su mehanizmi nastajanja oksidne prevlake na metalima, a uobičajeno se dijele prema procesu difuzije kroz nastalu prevlaku. Za neke metale sloj oksida pruža zaštitu od daljnjeg okolišnog utjecaja dok kod ostalih metala oksidna prevlaka puca i ljušti se pa nije zaštitna. Metali i njihove slitine, izloženi zraku na povišenim temperaturama, tvore stabilne oksidne spojeve.

Postoji svega nekoliko izuzetaka od ovog pravila kao npr. zlato. Na stabilnost oksida metala ukazuje njihova razmjerno visoka temperatura taljenja u odnosu na talište čistog metala. Aluminij se tali na 660°C, a talište aluminijevog oksida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je na 2054 °C. Tanki površinski sloj oksida na nekim metalima može nastati čak na sobnoj temperaturi. Ova kemijska reakcija s kisikom iz atmosfere (oksidacija) može za neke metale biti glavno ograničenje njihove tehničke primjene. Druge metale tanki površinski sloj (film) oksida štiti od daljnjeg okolišnog utjecaja [9].

#### 2.2.4. Difuzija

Difuzija je pojava premještanja tvari u plinovitom, tekućem i čvrstom stanju. Premještanje tvari je kretanje ili zamjena mjesta atoma, iona ili molekula u plinovima tekućinama i krutini. Najzanimljivija je difuzija atoma u čvrstom stanju. Na osnovi određenih činjenica difuzija bi trebala biti nemoguća u savršenom kristalu, jer u čvrstim tijelima svaki atom, odnosno ion, ima dobro definirano mjesto u kristalnoj rešetki; a toplinsko gibanje sastoji se samo od titranja oko fiksnog ravnotežnog položaja u rešetki. No, pokusi pokazuju da i u čvrstim tijelima dolazi do difuzije iako u manjoj mjeri u usporedbi s tekućinama. Ako se npr. mehanički spoje dva bloka metala, recimo olova i zlata, prethodno dobro očišćenih površina, i grije nekoliko dana na temperaturi od oko 3000 °C, uočava se ulazak olovnih atoma u zlato, i obrnuto. Iako je sloj penetracije manji od mikrometra, neupitno je da je proces difuzije bio u toku. To međutim nije moguće ako pokus pokušamo napraviti s Al i Pb; dakle i u kristalnom stanju postoje materijali koji se miješaju (međusobno su topivi) i materijali koji se ne miješaju (nisu međusobno topivi) [10]. U krutini kretanje atoma u kristalima može biti na:

- Supstitucijski način (Slika 16)
- Intersticijski način (Slika 17)



Slika 16. Supstitucijski mehanizam kretanja atoma [11]

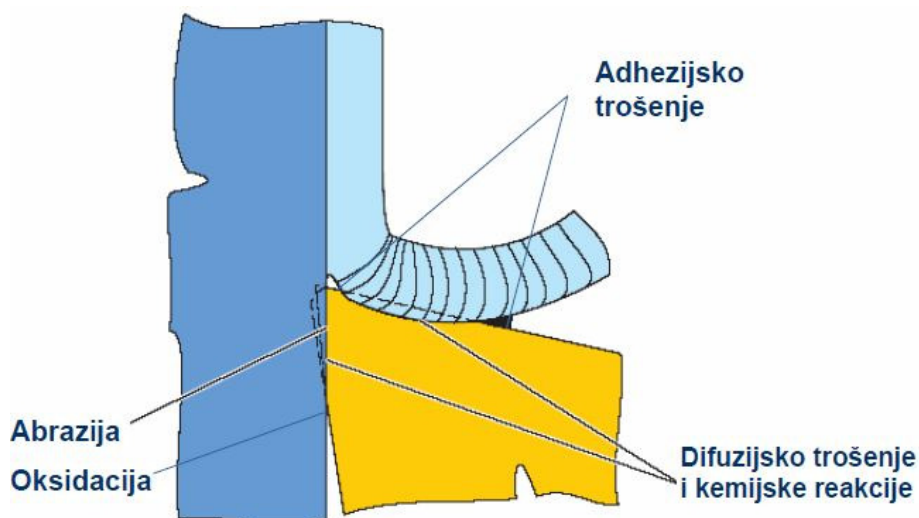
Kod supstitucijskog načina dolazi do izmjene mjesta između atoma i vakancije (praznog mjesta). Ukoliko dolazi do izmjene mjesta između vlastitih atoma i vakancija govori se o samodifuziji koja je prisutna kod čistih metala. Kod legura mjesta mogu izmjenjivati atomi primjese i vakancija u osnovnom metalu [11].



Slika 17. Intersticijski mehanizam kretanja atoma [11]

Kod intersticijskog mehanizma imamo praznine, a uključinski atom, koji je manji od ostalih atoma, se kreće unutar tih praznina.

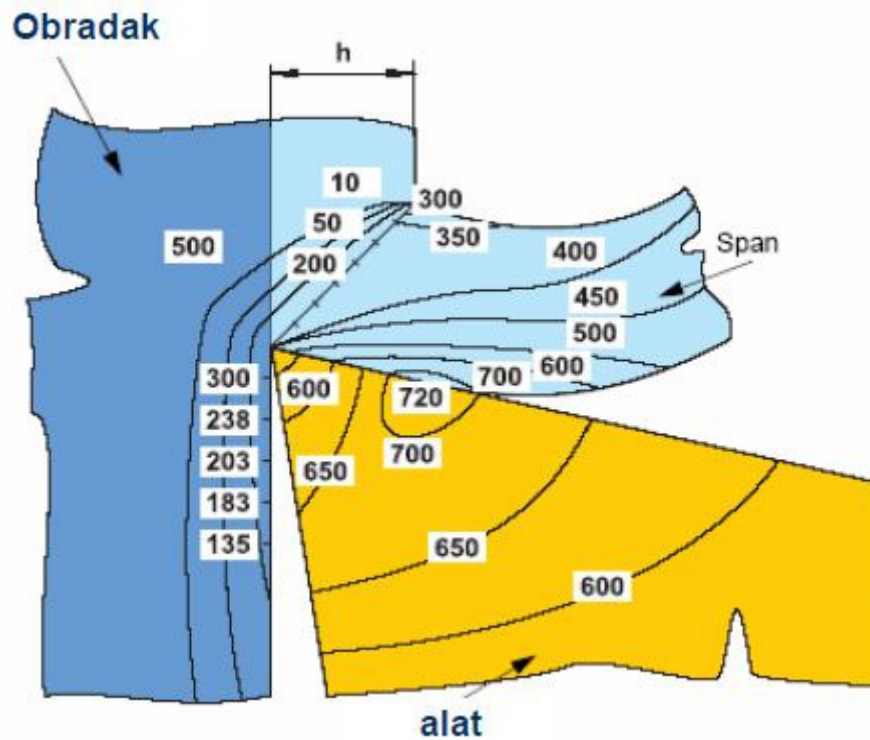
Difuzija je od izričite važnosti u fizici materijala. Procesi, koji bi na sobnoj temperaturi u usporedbi s prosječnom dužinom života čovjeka trajali praktički vječno, na povišenim temperaturama mogu se zbiti unutar nekoliko minuta, a to omogućava metalurškoj industriji kao i industriji poluvodiča da proizvodi odgovarajuće materijale za svakodnevnu upotrebu [10].



Slika 18. Mehanizmi trošenja na alatu tijekom obrade [5]

Na slici 18 vide se mjesta na reznom alatu u zahvatu na kojima nastaju pojedini mehanizmi trošenja. Na prednjoj površini alata najveći utjecaj imaju adhezijsko i difuzijsko trošenje iz razloga što se na tom mjestu zbog veoma visokih sila trenja javljaju visoke temperature (slika 19) te dolazi do mikrozavarivanja i skidanja čestica materijala s alata. Na stražnjoj površini koja je također u dodiru s obratkom ne javljaju se iznimno visoke temperature, ali ipak dolazi do abrazijskog trošenja zbog klizanja alata po obrađenoj površini, a uzrok tome je unos topline i promjene dimenzije obratka. Na dijelu koji je u dodiru sa

zrakom zbog povišene temperature dolazi do oksidacijskog trošenja. Iz toga se može zaključiti kako je prva skupina mehanizama trošenja, abrazija i adhezija, prisutna uvijek kod obrade i prevladava kod nižih temperatura dok je druga skupina, odnosno difuzija i oksidacija, karakteristična za povišene temperature



Slika 19. Temperature u zoni obrade [5]



## 2.3. Oblici trošenja

Tijekom procesa obrade rezanjem alat je izložen različitim uvjetima koji uzrokuju različite mehanizme trošenja na pojedinim dijelovima alata. Kako tijekom zahvata postoje različiti uvjeti pojavljuju se i različiti oblici trošenja na određenim mjestima na alatu. Različiti uvjeti obrade pojavljuju se zbog različitih brzina rezanja, promjenjivog kuta rezanja, različitih dubina rezanja, oblika reznog alata, vrste odvojenih čestica i njenog odvođenja te načina hlađenja odnosno odvođenja topline.

Oblici trošenja koji se mogu pojaviti prilikom obrade kod reznih alata mogu biti:

- Trošenje stražnje površine
- Kratersko trošenje
- Zarežno trošenje
- Plastična deformacija
- Naljepak (BUE)
- Toplinska napuknuća
- Uzdužna napuknuća
- Razgradnja oštrice
- Lom oštrice

### 2.3.1. Trošenje stražnje površine

Trošenje stražnje površine uzrokuje prevelika brzina rezanja ili premala otpornost trošenju. Brzo trošenje stražnje površine uzrokuje lošu kvalitetu površine i netočnost dimenzija. Kako bi se trošenje stražnje površine smanjilo na čim manju mjeru potrebno je smanjiti brzinu rezanja ili izabrati materijal alata koji ima veću otpornost na trošenje [5]. Slika 20 prikazuje primjer trošenja stražnje površine alata.



Slika 20. Trošenje stražnje površine alata [5]

### 2.3.2. Kratersko trošenje alata

Kada tijekom obrade dolazi do previsokih temperatura i pritiska na prednjoj površini alata pojavit će se kratersko trošenje alata. Pojava kratera uzrokuje slabljenje oštrice i lošu kvalitetu obrade. Kako bi se spriječila pojava kraterskog trošenja, potrebno je smanjiti brzinu rezanja, a samim time i temperaturu, smanjiti posmak, izabrati alat veće otpornosti na trošenje ili izabrati alat pozitivne geometrije [5]. Na slici 21 može se vidjeti primjer kraterskog trošenja.



Slika 21. Kratersko trošenje alata [5]

### 2.3.3. Zarežno trošenje

Zarežno trošenje uzrokuje prevelika brzina rezanja ili premala otpornost na trošenje alata. Zarežno trošenje uzrokuje lošu teksturu obrađene površine i unosi rizik loma oštrice. Načini na koje se može smanjiti zarežno trošenje su odabir alata sa većom otpornošću, manja brzina rezanja ili smanjenje kuta prednamještanja alata,  $\kappa$ , kod kaljenih materijala alata.



Slika 22. Zarežno trošenje alata [5]

#### 2.3.4. Toplinska napuknuća

Oscilacije temperature, prekidni rez i nejednoliki dotok SHIP-a dovode do toplinskih napuknuća na alatu. To su mala napuknuća okomito na oštricu koja uzrokuju krzanje i lošu kvalitetu obrađene površine, a primjer takvog trošenja može se vidjeti na slici 23. Moguća rješenja za smanjivanje toplinskih napuknuća su izbor žilavijeg materijala alata ili suha obrada.



Slika 23. Toplinska napuknuća na alatu [1]

#### 2.3.5. Krzanje oštrice

Ako imamo krhku ili "preslabu" oštricu alata ili ako se stvorio naljepak na prednjoj površini alata može doći do krzanja oštrice kao što je prikazano na slici 25. Takva vrsta oštećenja uzrokuje lošu teksturu obrađene površine i preveliko trošenje stražnje površine alata. Kako bi se smanjilo krzanje oštrice potrebno je odabrati žilaviji i čvršći materijal alata, povećati brzinu rezanja, odabrati alat s pozitivnom geometrijom odnosno smanjiti kut  $\kappa$ , smanjiti posmak na početku reza i povećati stabilnost [5].



Slika 24. Krzanje oštrice alata [1]

### 2.3.6. *Naljepak*

Naljepak na alatu odnosno reznjoj oštrici, čiji se primjer može vidjeti na slici 26., pojavljuje se kod preniske temperature rezanja te velikom afinitetu materijala kao što su niskouglični čelici, aluminij i nehrđajući čelici. Naljepak uzrokuje lošu kvalitetu obrađene površine i krzanje dijelova alata s otkidanjem naljepka. Načini na koji se može smanjiti ovakvo trošenje su povećanje brzine rezanja, odabir odgovarajućeg alata te pozitivna geometrija alata [5].



Slika 25, Naljepak na oštrici alata [5]

### 3. BUŠENJE

Bušenje je postupak obrade odvajanjem čestica (rezanjem) koji se upotrebljava za bušenje provrta manjih promjera ili za proširivanje na provrte većih promjera. Izvodi se na različitim vrstama alatnih strojeva kao što su tokarilica i glodalica, ali pretežno na bušilicama, pri čemu je glavno gibanje kružno kontinuirano, a posmično gibanje pravolinijsko kontinuirano i izvodi se istodobno kad i glavno gibanje. Ako se obrada izvodi na bušilicama, sva gibanja izvodi alat [12]. Bušenje je povezano s predradnjom zabušivanja i naknadnim operacijama proširivanja, upuštanja, razvrtanja i izbušivanja. Za bušenje se koriste različite vrste strojeva tj. bušilica, ovisno o njihovoj izvedbi.

Alat za bušenje je svrdlo, definirane geometrije reznog dijela, s dvije glavne rezne oštrice i jednom poprečnom oštricom koja otežava obradu. Svrdla se dijele na: spiralna svrdla, svrdla za središnje uvrte te posebna svrdla za duboko bušenje. Rezni dio svrdla izrađuje se od materijala znatno veće tvrdoće od obrađivanog materijala, a najčešće se koriste brzorezni čelik i tvrdi metal [12].

Bušenje karakterizira:

- mala krutost sustava.
- otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP-a,
- promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice,
- promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice

#### 3.1. Parametri bušenja

Osnovni parametri kod bušenja su brzina rezanja, posmična brzina, broj okretaja svrdla, promjer svrdla i dubina bušenja. Brzina rezanja  $v_c$  je obodna brzina na svrdlu, tj. brzina s kojom alat obrađuje obradak. Brzina rezanja ovisi o alatu kojim se buši, o potrebnom stanju površine nakon bušenja, o hlađenju za vrijeme bušenja, o snazi stroja te o posmaku. Brzine rezanja se mogu naći u obliku dijagrama, tablica, a ima i programskih podrška koje same računaju potrebne parametre.

Posmak  $v_f$  je relativna brzina gibanja alata prema obratku, a kod bušenja uvijek u pravcu osi rotacije. To je brzina ulaza alata u materijal. Mjeri se u mm/min.

Posmak po okretaju  $f$  (mm/okr) određuje se kao aksijalni pomak alata tijekom jednog okretaja. Koristi se za računanje dubine penetracije, te za definiranje posmaka bušenja.

Za bušenje različitih materijala koriste se različiti parametri. O materijalu ovisi vršni kut glodala,  $2\phi$ . Za poboljšane i legirane čelike te za sivi lijev taj kut iznosi  $118^\circ$ . Za bakar, broncu i aluminijske legure kut iznosi  $140^\circ$ , dok za magnezijeve slitine iznosi  $100^\circ$  [13].

### 3.2. Svrldo

Najvažniji tip svrdla kod obrade bušenjem je spiralno svrdlo. Kao i svaki alat, svrdlo ima radni dio i držalo. Držalo može biti cilindričnog ili konusnog oblika (cilindričan je kod manjih svrdla i svrdla za ručno bušenje, a konusni je kod svrdla za strojnu obradu). Osnovne osobine radnog dijela spiralnog svrdla su konusni radni vrh i dva spiralna utora za odvod čestica.

Svrkla su alati koji se upotrebljavaju za bušenje i proširivanje provrta različitih dubina u raznim materijalima. Spiralno svrdlo, prikazano na slici 26, se sastoji od [4]:

- radne dužine svrdla ( $l_3$ ) koja sadrži spiralne utore, a uključuje u sebi rezni i kalibrirajući dio svrdla,
- reznog dijela koji je izbrušen u konus, tj. kut vrha svrdla ( $2\phi$ ),
- usmjeravajućeg (kalibrirajućeg) dijela ( $l_1$ ) – dio svrdla koji osigurava usmjeravanje svrdla u procesu rezanja,
- drška ( $l_2$ ) – dio svrdla koji služi za pričvršćenje svrdla i prijenos okretnog momenta na svrdlo.



Slika 26. Prikaz spiralnog svrdla [4]

Osnovni dijelovi spiralnog svrdla su :

- prednja površina,
- stražnja površina,
- glavna oštrica (spoj prednje i stražnje površine),
- utor za odvođenje čestica i za dovod rashladne tekućine,
- poprečna oštrica,

- rub – uski pojas na cilindričnoj površini svrdla raspoređen uzduž zavojnog utora koji služi za usmjeravanje svrdla pri bušenju

Vrh svrdla s poprečnom oštricom nepovoljno djeluje na bušenje, jer prodire u materijal gnječenjem, a ne bušenjem, te na njega otpada oko 40% vrijednosti aksijalne komponente sile bušenja. Spiralni utor služi za lako odvođenje odvojene čestice, ali ne smije oslabiti tijelo svrdla, već ga mora svojim oblikom učvrstiti. Obično se izrađuje glodanjem, a dimenzije profila zubi glodala za izradu utora ovise od: traženog oblika oštrice svrdla, potrebnog promjera jezgre, uzvojnog kuta uspona spirale, kuta vrha spirale, položaja glodala u odnosu na os svrdla, promjera glodala.

### **3.3. Trošenje svrdla kod bušenja**

Trošenje alata kod bušenja je spor i progresivan fenomen gdje su puknuća alata i rezne oštrice nerijetko iznenadne i bez ikakvih prijašnjih upozorenja. Iako se svrdlo počinje trošiti čim započinje bušenje, izraženije trošenje počinje tek kada svrdlo postane tupo. Kod operacije bušenja, kako bi mogli direktno izmjeriti istrošenost svrdla koju je uzrokovala operacija bušenja, potrebno je nakon bušenja izvaditi svrdlo iz bušilice ili pomoću instaliranog uređaja za mjerenje na samom stroju tj. bušilici izmjeriti istrošenost. Analizirajući sliku površine rezne oštrice alata može se okarakterizirati trošenje alata i procijeniti stanje alata jer je trošenje zapravo deformacija površine alata, a intenzitet svjetlosti koja se odbija od te površine se mijenja kako se alat troši. Iako bi se takva metoda mogla upotrijebiti za dosta dobro očitavanje stanja alata, samo uklanjanje svrdla iz stroja ili postavljanje mjernog uređaja nije primjereno za automatizirane procese. Uklanjanje svrdla iz stroja ili točnije iz zahvata tijekom procesa bušenja nije poželjno jer se takvom radnjom može ugroziti završna kvaliteta provrta. Ako bi se koristili posebni uređaji za mjerenje, isti bi morali biti postavljeni veoma blizu samo procesa obrade te bi mogli utjecati na sam proces bušenja. Tijekom procesa bušenja nije moguće nikakvim vizualnim sredstvima izmjeriti ili procijeniti stanje svrdla [14].

#### 4. SVOJSTVA KAMENA I NJIHOV UTJECAJ NA OBRADU

Mehanička i fizikalna svojstva kamena uvelike utječu na sam proces obrade kamena. Minerali koji se nalaze u kamenu različito utječu na proces rezanja, a isto tako i na materijal alata koji se koristi prilikom obrade. Ostali parametri utječu na sile koje se javljaju između alata i obrađivanog predmeta, distribuciju naprezanja u kamenu i temperature između alata i obratka [15].

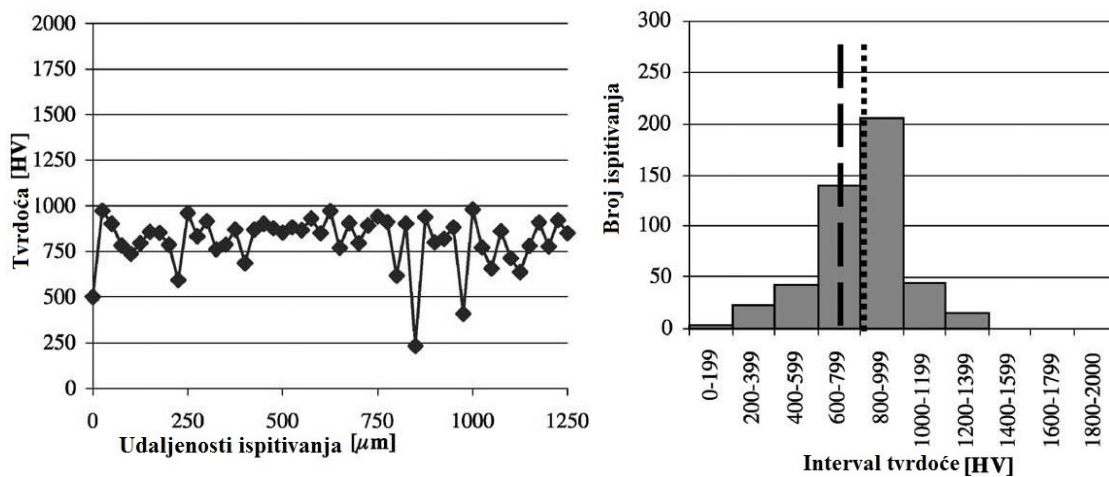
Jedno od najvažnijih svojstava kamena je njegova čvrstoća. Čvrstoća je otpor prema vanjskom mehaničkom efektu. Čvrstoća se također može definirati kao najveće naprezanje ili energija koju kamen može podnijeti bez nastanka štete. Čvrstoća kamena se u najčešćim slučajevima definira kao tlačna čvrstoća. U procesima rezanja udarna čvrstoća je također veoma važna jer je kamen tijekom obrade izložen naizmjeničnim udarnim opterećenjima [20].

Tvrdoća kamena je veoma važno svojstvo pogotovo kod obrade rezanjem. Generalno se u procesima rezanja kamena koristi Mohs skala za jednostavno određivanje tvrdoće minerala. U Mohs skali svaki mineral koji ima veći broj je tvrdi od prethodnog i može ga oštetiti u svakom slučaju. Za tvrdoću kamena se također koristi i Shore-ov test tvrdoće gdje se dijamanтни dio baci na testni uzorak, a tvrdoća se mjeri prema visini odskoka. Još jedno svojstvo kamena koje utječe na proces rezanja je abrazivnost. Zbog toga svojstva potrebno je odrediti pravilne materijale alata kojim će se obrađivati kamen kako bi se mogao dobiti željeni rezultat [16].

Jedno od najvećih problema kod obrade kamena je zapravo nehomogenost njegove strukture. Svojstvo gotovo svakog kamena koji se koristi u građevinskoj industriji je to da se sastoji od više različitih tipova minerala te njihove distribucije unutar strukture kamena. Zbog tog svojstva kod obrade kamena moraju se uzeti u obzir svojstva i gustoća rasporeda tih minerala unutar strukture kamena. Nehomogenost kamena također onemogućava istraživačima stvaranje jedinstvenog algoritma kojim bi se mogao opisati proces obrade kamena. Razlog tog problema je da se različiti minerali pojavljuju na slučajnim mjestima unutar strukture kamena. Maksimalna i prosječna veličina zrna minerala koji se nakupljaju na pojedinim mjestima unutar strukture se najčešće mjere jer je pokazana uska povezanost između tog svojstva i relativne frekvencije pojave minerala unutar kamena. Još jedno svojstvo kamena koje ima utjecaj na proces obrade su veličina jakosti veza između pojedinih minerala unutar strukture kamena. Lako se može zaključiti kako će kamen koji ima jače veze između minerala unutar kamena biti teže obradiv pa će biti potrebne veće sile i tvrdi alati [16].



Na slici 27. prikazan je primjer testiranja tvrdoće granitnog kamena. Iz provedenih istraživanja došlo se do rezultata koji su prikazani u dijagramima iz kojih se može očitati kako tvrdoća kamena, kao posljedica njegove nehomogene strukture, nije ista na svakom dijelu kamena. Prosječna tvrdoća kamena utvrđena je iz rezultata koji su dobiveni na najvećem broju ispitivanja. U 45% ispitivanja došlo se do iznosa tvrdoće između 800 i 1000 HV, a u 75% ispitivanja tvrdoća je iznosila od 600 do 1000 HV. Iz toga se došlo do iznosa srednje tvrdoće, koja je prikazana točkastom isprekidanom linijom, od 800 HV [17].



Slika 27. Raspored tvrdoće granita: odnos tvrdoće i različitih mjesta ispitivanja i prosječni tvrdoća [17]

#### 4.1. Trošenje alata kod obrade kamena

Iako današnja tehnologija obrade odvajanjem čestica čvrsto napreduje prema velikom stupnju automatizacije još uvijek postoje neriješeni problemi kod bušenja, ali i kod ostalih obrada odvajanjem. To su problemi trošenja i puknuća alata. Zbog velike složenosti mehanizma trošenja još uvijek postoji dosta nejasnoća da bi mogli u potpunosti opisati tu pojavu. Nakon nekog vremena tj. nakon određene granice istrošenosti alata moguća je i pojava puknuća istog, što može izazvati veliku štetu na obratku pa čak i na stroju. Čak i ako je cijena svrdla odnosno. alata mala, s ekonomskog aspekta, vrijeme koje je potrebno uložiti u nabavu i zamjenu alata je prilično važno. Primarni oblici nadzora trošenja reznih alata pretpostavljaju vidne, slušne i intelektualne kapacitete operatera, pomoću kojih se nastoji izbjeći ili prepoznati lom alata.

Tribološka istraživanja su u vidu mehanizma rezanja, abrazije i poliranja počela s materijalima od metala i teorije rezanja metalnih materijala te se na temelju tih istraživanja došlo do određenih zaključaka i formula koje su se zatim počele primjenjivati na kamenu [18].

U raznim istraživanjima i primjerima rezanja metalnih materijala pojavljuju se različiti oblici trošenja alata kao što su trošenje prednje površine alata i kratersko trošenje te se isti asociraju s pojavom otupljenja alata tijekom obrade. Kako je trošenje prednje površine alata dosta širok pojam koji može prikazati trošenje na različitim mjestima oštrice, različitih duljina trošenja i različite jakosti pojavila su se razna istraživanja na tu temu. Na nekom kritičnom iznosu trošenja proces rezanja se uvelike pogoršava, odnosno kvaliteta rezanja se smanjuje, a nastavljanjem obrade s tako oštećenim alatom dolazi i do puknuća istog. Slični događaji javljaju se i prilikom obrade kamena, odnosno kod ekskavacije, bušenja ili rezanja kamena, bilo u tipu velikih razmjera na nalazištima ili manjih procesa obrade na alatnim strojevima. Iako se mehanika rezanja kamena u nekim slučajevima razlikuje od mehanike rezanja metala, zbog sličnog lomnog ponašanja krhkog kamena i zbog svojstava nehomogenosti, metali i kamen dijele dosta sličnih aspekata prilikom procesa rezanja. Primjer spomenutoga su trošenje alata i promjenjive sile rezanja prilikom obrade [19].

Prema Sandvik-ovom priručniku za ekskavaciju kamena [20] osim o kvaliteti alata, otpornost na trošenje ovisi o:

- čvrstoći i tvrdoći kamena,
- dubini rezanja,
- brzini rezanja,
- vrsti odnosno obliku alata ( ovisno o tome radi li se o alatu za drobljenje, rezanje ili bušenje)
- hlađenju

Može se primijetiti kako se iste karakteristike mogu pronaći i kod procesa obrade metalnih materijala. Kroz povijest provodila su se istraživanja koja su uključivala slične postupke i alate koji se koriste za obrade metala kako bi se objasnilo trošenje alata od polikristalnog dijamanta, PCD, prilikom obrade klasičnog sedimentnog kamena. U tim istraživanja došlo se do zaključka kako se, kao i kod obrade metalnih materijala, i u obradi kamena pokazuju korelacije između sila prilikom procesa obrade i istrošenosti alata[19].

## 5. ALATI ZA OBRADU KAMENA

Bez obzira koji se stroj ili alat koristi, za obradu prirodnog kamena generalno se koriste alati koji su izrađeni od segmenata koji se dobivaju sinteriranjem dijamantnih zrna i metalnog praha. U stadiju brušenja ili poliranja materijala od kamena u pravilu se koriste alati koji sadržavaju dijelove silicijevog karbida, SiC. Količina materijala koji se u tim procesima skida s obratka može se mijenjati, a ovisi o veličini abrazivnih zrna na alatu te količini pritiska alata na površinu obrađivanog materijala. Kada se koriste grublja zrna i veći pritisak dolazi do snažnijeg skidanja čestica s površine obrađivanog materijala dok se kod korištenja sitnijih zrna i manjih pritisaka skida manje materijala i dobiva se lijepo obrađena ili polirana površina na obratku [18].

S napretkom industrije dolazi do sve većih zahtjeva u pogledu brzine i kvalitete obrade prirodnog kamena pa je potrebno koristiti fleksibilnije i automatizirane proizvodne sustave kao što su CNC strojevi. Na ovakvim strojevima se za obradu kamena u najvećem broju koriste alati glodala, pila i svrdla od dijamanta. S takvim dijamantnim alatima moguća je brža, kvalitetnija i točnija obrada kamena uz što manje trošenje alata pogotovo kada se obrađuju kameni velikih tvrdoća kao što je npr. granit [18].

U obradi kamena se ponajviše koristi dijamant zbog njegove izrazito velike tvrdoće i toplinske provodnosti, a samim time i velike otpornosti na trošenje u odnosu na ostale materijale. Spomenuta svojstva omogućuju da se dijamant koristi u različitim procesima obrade kao što su rezanje, drobljenje ili poliranje. Dijamantna zrna, koja se koriste za obrade, dolaze u različitim oblicima, a za obradu se mogu koristiti i prirodna i umjetna zrna.

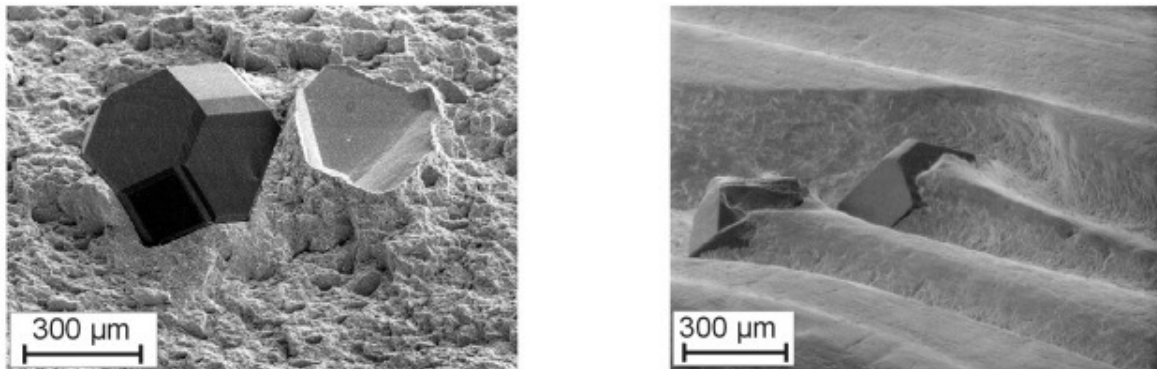
S većim zahtjevima za različitim oblicima proizvoda od kamena bilo je potrebno razviti različite alate kojima bi se mogao obrađivati kamen kako bi se dobili željeni proizvodi. Primjer takovih profilnih alata može se vidjeti na slici 28. Ti alati su konstruirani od različitih matrica i dijamantnih zrna te se mogu koristiti na CNC strojevima i tako omogućavati brze i točne obrade materijala od kamena.



Slika 28. Prikaz različnih alata za obradu kamena s dijamantnim zrnima [7]

## 5.1. Dijamantni alati u obradi kamena

Primjena dijamantnih alata, s metalnom vezom u procesima obrade kamena i drugih materijala, počela je krajem 20. stoljeća. Predstavljanje takovih alata dovelo je do revolucije u cijelom sektoru obrade materijala jer su se drastično povećale brzine obrade odnosno produktivnost. Iako je tijekom vremena došlo do značajnih poboljšanja i ostalih alata, dijamantni alati su još uvijek glavni faktor što se tiče odnosa iskoristivosti i troškova. Zbog toga je potrebno detaljno znanje o samim procesima rezanja i načinu trošenja ovakvih alata.



Slika 29. Prikaz dijamantnog zrna i kobaltne matrice [21]

Faktori koji direktno ili indirektno utječu na proces rezanja su:

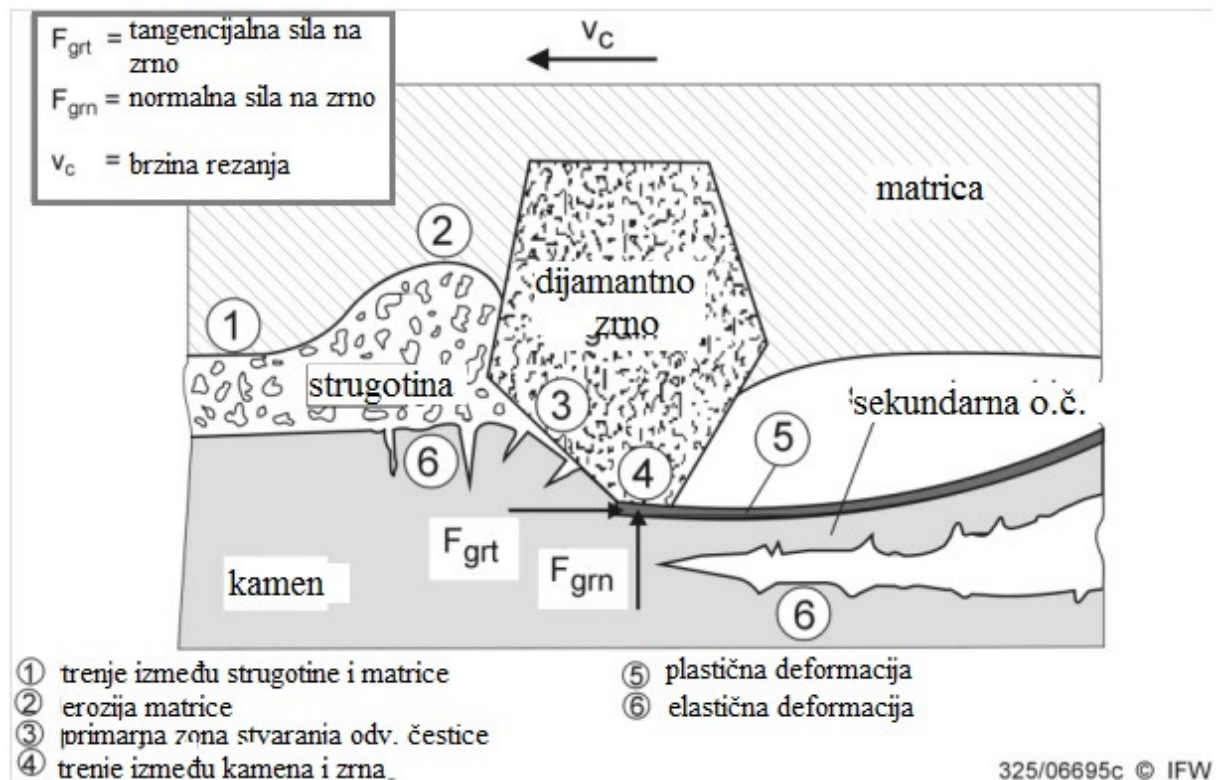
1. Svojstva kamena
2. Sile između dijamanta i materijala
3. Distribucija naprežanja u kamenu
4. Temperature prilikom procesa obrade

Kada se obrađuje kamen s dijamantnim alatima interakcija između alata i obratka rezultira pojavljivanjem sila, najčešće uzrokovanih sljedećim faktorima:

- Elastična i plastična deformacija obratka,
- Trenje između kamena i dijamanta,
- Trenje između kamena i matrice,
- Trenje između matrice i odvojene čestice

U području ispred zrna dijamanta koje obavlja proces rezanja pojavljuju se naprežanja. U tom području stvara se odvojena čestica zbog tlačnih i vlačnih naprežanja. Taj proces se

naziva formiranje odvojene čestice. Odvojena čestica se potiskuje ispred i sa strane dijamantrnog zrna. Proces stvaranja odvojene čestice može se vidjeti na slici 30.



Slika 30. Proces stvaranja odvojene čestice kod obrade kamena s dijamantrnim alatom [22]

Kako bi se pokazao utjecaj svojstva elastičnosti kamena potrebno je postići određenu dubinu rezanja dijamantrnim zrnom. Materijal koji se obrađuje je deformiran pomoću tlačnih sila koje nastaju ispod dijamantrnog zrna. Kada se takvo naprezanje makne, dolazi do elastičnog povrata koji dovodi do kritičnog vlačnog naprezanja koje zatim uzrokuje krhki lom. To područje je prikazano na slici 30 kao sekundarna odvojena čestica. Takva odvojena čestica se odvodi sredstvom za hlađenje [22].

### 5.1.1. Suvremeni postupci proizvodnje dijamantrnih alata

U novije vrijeme proizvodnja dijamantrnih alata odnosno dijamantrnih zrna i materijala matrice se okreće prema visoko kvalitetnim dijamantrnim granulama s prevlakom od titana ili kroma zajedno s vezama otpornim na trošenje i malim udjelom kobalta. Takve tehnike prevlačenja dijamanata pružaju puno bolje zadržavanje dijamantrnih kristala unutar materijala matrice.

Kako bi se zadovoljili suvremeni ekološki i ekonomski zahtjevi počeli su se koristiti novi metalni prahovi kako bi djelomično zamijenili kobalt u segmentima povezivanja

dijamantnih zrna. Ovakvi metalni prahovi imaju svojstva slična čistom kobaltu. Ti prahovi sastoje se od veoma finih čestica bakra, željeza i kobalta s time da svaka elementarna čestica sadrži sva tri metala. Nakon sinteriranja ovakvi prahovi pružaju veoma homogenu i veoma finu strukturu te pružaju veoma dobra svojstva prilikom obrade [23].

TSD (Thermally Stable Diamond) ili temperaturno stabilni dijamantni alati proizvode se ili kao kompoziti u kojima su dijamanti reakcijski povezani sa silicijevim karbidom ili kao PCD dijamanti iz kojih se izvukao kobaltni katalizator pomoću nagrizanja s kiselinom. TSD je umjetno proizvedeni dijamantni materijal koji je temperaturno stabilan do 1200 °C. Rezna pločica od TSD alata sastoji se od dvije komponente, matrice i reznog dijela. Kod konvencionalnih PCD alata matrica se uglavnom sastoji od wolfram karbida i kobalta ( WC-Co ). Degradacija PCD alata počinje nakon zagrijavanja na temperaturu od 750 °C zbog prisustvovanja ostataka otapala odnosno katalizatora [24].

## **5.2. Mehanizmi trošenja dijamantnih alata**

Niti jedan samostalni indikator svojstva kamena ne može dati zadovoljavajuće predviđanje trošenja. Trošenje dijamantnih alata može biti na različite načine, ali najčešći mehanizmi trošenja prilikom bušenja kamena su abrazija, toplinski zamor materijala te udarna opterećenja. Zbog utjecaja različitih svojstava i mineralne strukture kamena mogu se pojaviti različiti načini i segmenti trošenja alata ovisno o komponentama reznog dijela, a isto tako i parametrima obrade. Tako se trošenje može podijeliti na trošenje matrice i trošenje dijamantnog zrna.

Mehanizam koji direktno utječe na dijamant je abrazija. Na jednoj strani abrazivni efekt kamena zajedno s visokim mehaničkim i toplinskim napreznjima uvelike utječe na trošenje zrna. Na drugoj strani sredstvo za hlađenje u kombinaciji sa strugotinom stvara abrazivni materijal koji uzrokuje eroziju matrice. Oba ova slučaja imaju velik utjecaj na ponašanje trošenja i na rezultat procesa obrade [22].

Trenje uzrokovano strugotinom uglavnom ovisi o strukturi kamena. Tako može postojati strugotina koja ima zrna manja od zrna materijala alata kojim se vrši obrada. Na primjer, kod sedimentnog kamena tijekom obrade pucaju veze između zrna zbog malih sila vezivnog materijala što dovodi do pojave malih i tvrdih zrna. U tom slučaju efekt trošenja dijamantnog zrna nije toliko izražen koliko trošenje matrice zbog tih visoko abrazivnih čestica.

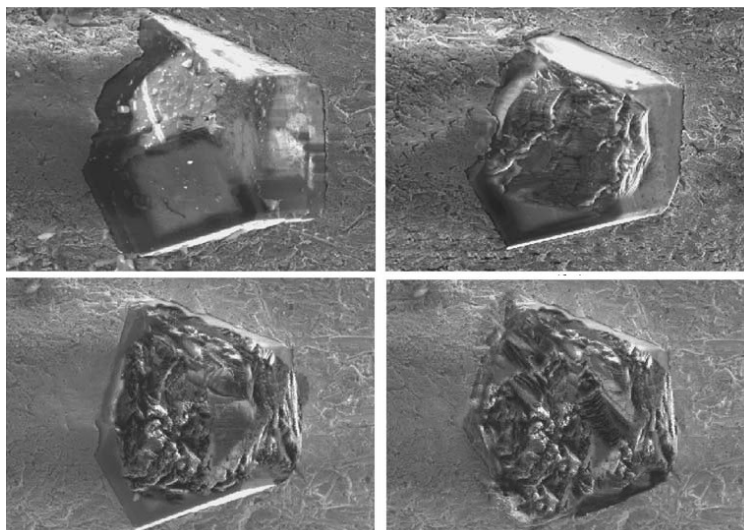


Trošenje dijamantnog zrna može se pojaviti kao [22]:

1. Adhezijsko trošenje: dijamant stvara adhezijski spoj na površini kamena nakon kojeg dolazi do kidanja čestica,
2. Trenje: veoma tvrde čestice kamena grebu površinu dijamanta
3. Difuzija: kemijske reakcije između dijamanta i površine kamena uzrokuju slabljenje čvrstoće ili tvrdoće
4. Puknuće zrna: do puknuća dolazi zbog prevelikog toplinskog ili mehaničkog naprezanja te zbog zamora materijala

Istraživanja [25] su pokazala da trošenje uzrokovano adhezijom i difuzijom nije značajno u procesima obrade kamena.

Puknuća dijamanta i trošenje uzrokovano trenjem su glavni čimbenici koji uzrokuju smanjenje zrna. Način trošenja ovisi o različitim napreznjima tijekom rezanja. Tako će na primjer kod protusmjernog načina obrade s niskom brzinom rezanja i homogenim kamenom doći do jednakomjernog trošenja dijamanta. Kod većih brzina rezanja i istosmjernog načina obrade kamena s tvrdim dijelovima doći će do puknuća dijamantnih zrna zbog udarnog opterećenja. Primjer progresije trošenja dijamantnog zrna može se vidjeti na slici 31.



**Slika 31. Trošenje dijamantnog zrna [21]**

Obrada kamena koristeći alate od dijamanta sastoji se u odnošenju mineralnih konstituenta kamena koristeći tvrda dijamantna zrna. Dijamantni alat sastoji se od tijela alata, abrazivnih dijelova i veziva. Na tijelo alata se pričvršćuje dio s vezivom i abrazivnim odnosno

dijamantnim zrnima i služi za prijenos kinetičke energije od stroja do abrazivnih zrna. Abrazivna zrna su karakterizirana s granulacijom, oblikom i koncentracijom.

Mnoga istraživanja pretpostavljaju, kao uvjet za istrošenost alata, trošenje stražnje površine, puknuća, kratersko trošenje i plastičnu deformaciju. Trošenje stražnje površine i kratersko trošenje je općenito prihvaćeno kao normalni način trošenja alata. U slučaju dijamantnih alata trošenje stražnje površine ne igra važnu ulogu [26].

Trošenje dijamantnog glodala rezultat je progresivnog trošenja dijamantnih zrna. Na početku obrade dijamantna zrna imaju određenu visinu i minimalno površinsko oštećenje, što se može vidjeti na slici 3. Nakon određenog vremena obrade zrno počinje gubiti svoju visinu i počinje se zaokruživati. Prekidna udarna opterećenja kod obrade stvaraju naprezanja na zrnu koja polako uništavaju zrna i njegovu mogućnost obrade te na kraju dolazi do pucanja. Ovaj događaj je još više potaknut heterogenom strukturom kamena. Rezultat trošenja su mikropuknuća na zrnu koja povećavaju broj reznih oštrica, ali i smanjuju visinu zrna odnosno dubinu rezanja. Proces se nastavlja sve dok alat ne izgubi mogućnost obrade odnosno dok se ne potroše sva dijamantna zrna [26].

Osim trošenja zrna, abrazivne čestice koje se sastoje od sredstva za hlađenje i čestica kamena dovode do erozije vezivnog materijala odnosno matrice. Zbog toga je potrebno pažljivo odabrati materijal matrice jer u suprotnom može doći do sljedećeg [22]:

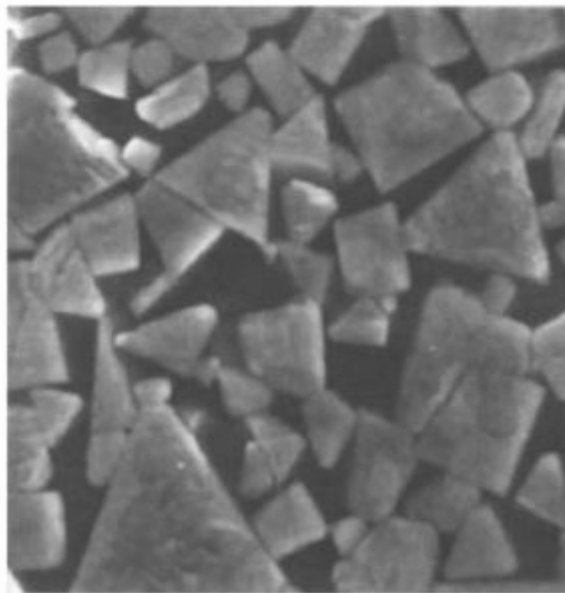
- Prebrzo trošenje matrice – dijamantno zrno nije u potpunosti iskorišteno prije nego ispadne van iz matrice
- Presporo trošenje matrice – smanjuje se prostor između reznog dijela i matrice što dovodi do nemogućnosti odvođenja odvojene čestice i zrno gubi mogućnost obrade

Na samo trošenje utječu također i parametri obrade. Istraživanjem se došlo do sljedećih utjecaja parametara obrade kod korištenja dijamantnih alata u procesima obrade kamena [22]:

- Dubina rezanja – veća dubina rezanja, veća duljina kontakta, veća termalna naprezanja na dijamantnom zrnu
- Posmična brzina – veća posmična brzina, manja toplinska naprezanja na dijamantu
- Brzina rezanja – veća brzina rezanja, veća toplinska naprezanja

### 5.3. Obrada kamena tvrdim metalom

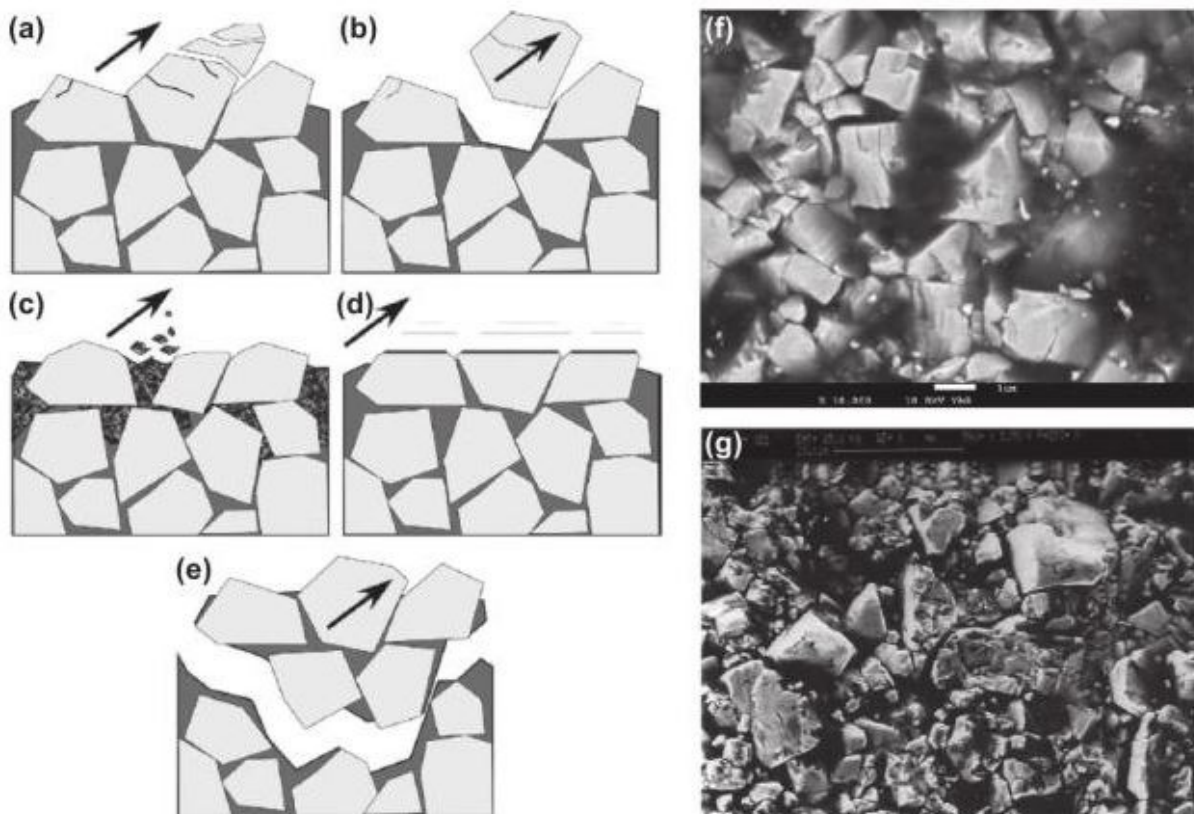
Alati od tvrdog metala koriste se u različitim procesima obrade metalnih materijala, ali isto tako i nemetalnih materijala. Tvrdi metali sastoje se od volframovih karbida, titana i kobalta kao vezivnog sredstva. Karbidi imaju visoku tvrdoću prema tome i visoku otpornost prema trošenju. Povećavanjem sadržaja vezivnog materijala povećava se žilavost koja je potrebna prilikom udarnih opterećenja, ali se u isto vrijeme smanjuje otpornost na trošenje. Tijekom rezanja na povišenim temperaturama promjena tvrdoće je zanemariva pa se proces često izvodi bez sredstva za hlađenje. U procesu obrade s konstantnim otporom rezanja tvrdi metali sastoje se od oko 95% karbida i 5% vezivnog sredstva. U procesima s češćim udarnim opterećenjima tvrdi metali imaju više vezivnog materijala, do 30%. Kada se tvrdi metali primjenjuju za obradu nemetalnih materijala kao što je kamen, veličina zrna se nalazi u rasponu od 0,2 do 8  $\mu\text{m}$ , a udio faze veziva od kobalta iznosi od 5 do 30% [27]. Tipična mikrostruktura tvrdog metala od volfram karbida i veziva od kobalta može se vidjeti na slici 32.



Slika 32. Tipična mikrostruktura WC-Co tvrdog metala [27]

I u slučaju rezanja metalnih kao i nemetalnih materijala dobra otpornost na trošenje je ključni faktor tijekom procesa. Uvjeti pod kojima se pojavljuje trošenje mogu biti visoke temperature, visoka naprezanja, udarna opterećenja i agresivna okolina. Njihovo jedinstveno svojstvo visoke tvrdoće u kombinaciji s relativno visokom čvrstoćom pridonosi dobroj otpornosti na trošenje [27].

Upotreba alata od tvrdog metala vrlo je česta u obradi kamena. Sam proces obrade kamena može se podijeliti u više kategorija ovisno o tome kakvi se alati koriste (glodala ili svrdla) i na koji način se vrši obrada (bušenje, drobljenje, rezanje). Kada se obavlja proces bušenja alat je izveden na način da je pločica, odnosno rezni dio od tvrdog metala, umetnut u čelično tijelo alata. Prilikom bušenja kamena rezni alat izložen je tlačnom naprezanju, abrazivnom trošenju i toplinskim udarima. Na slici 33 mogu se vidjeti najvažniji mehanizmi trošenja alata od tvrdog metala koji se pojavljuju prilikom bušenja kamena.

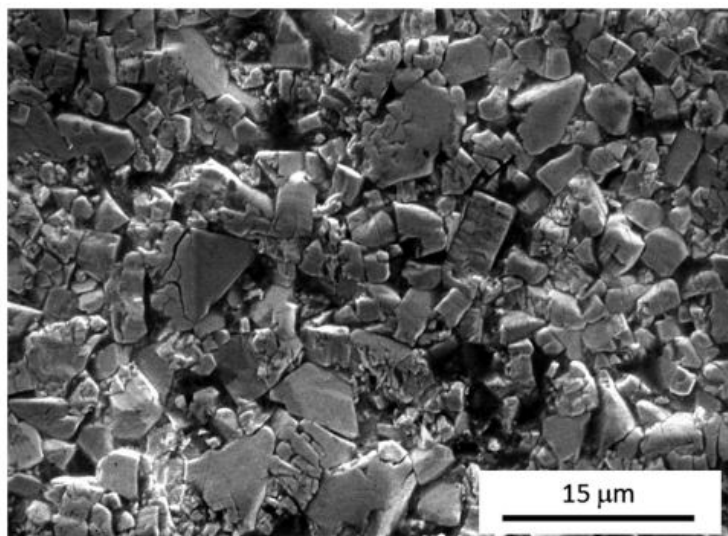


Slika 33. Primjeri trošenja tvrdog metala kod obrade kamena [27]

Na slici 33 oznakom „a“ je prikazano drobljenje zrna od volframovog karbida i odvajanje dijelova zrna. Oznakom „b“ prikazano je odvajanje cijelog zrna WC-a od mikrostrukture tvrdog metala. Trošenje i odvajanje vezivnog dijela označeno je oznakom „c“. Korozija i oksidacija može se vidjeti na slici pod oznakom „d“. Oznakama „f“ i „g“ prikazana je mikrostruktura tvrdog metala u kojoj su zrna od volframovog karbida podignuta u odnosu na površinu alata što je posljedica abrazivskog trošenja i odvajanja vezivnog dijela. Takvo trošenje može uzrokovati pojavu pukotina i čak ispadanje zrna od WC-a što na kraju dovodi do ubrzanog trošenja cijelog reznog dijela alata.

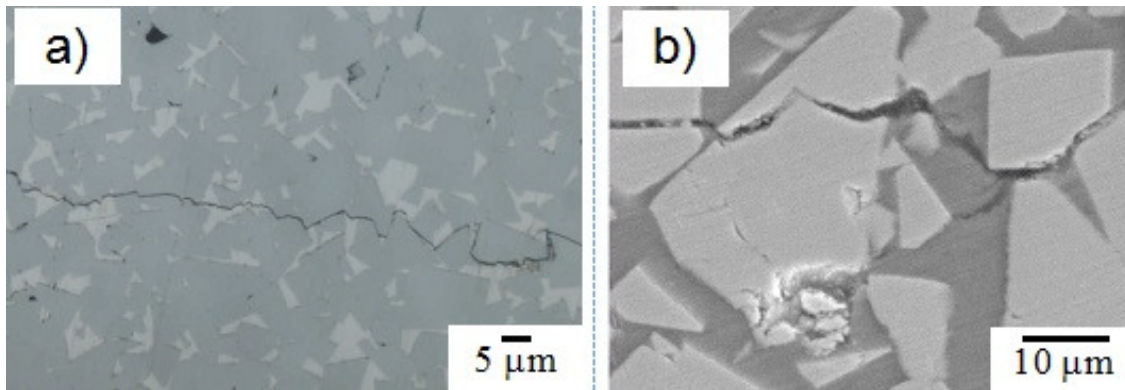
#### 5.4. Mehanizmi trošenja alata od tvrdog metala kod obrade kamena

Istraživanja [28] su pokazala kako je trošenje alata od tvrdog metala u dobroj korelaciji s tvrdoćom kamena no točan mehanizam trošenja teško je ustanoviti. Izolirani slučaj je pješčenjak, gdje je stupanj trošenja duplo veći nego kod tvrdog kamena. Istraživanja su pokazala da prilikom obrade kamena dolazi do intenzivne abrazije. Ispitivanjima abrazivnog trošenja tvrdog metala došlo se do različitih mehanizama trošenja alata. Tako se u najranijim istraživanjima mislilo kako je izdvajanje kobalta, Co, što dovodi do smanjenja mehaničkog integriteta, jedno od najvećih čimbenika kod trošenja alata od tvrdog metala. Naravno da postoje i dokazi izdvajanja kobalta iz tvrdog materijala kao i dokazi da površinski slojevi tvrdog metala imaju manji sadržaj vezivne faze nego unutarnji dio. Kao važan mehanizam trošenja također se može smatrati i mehaničko odstranjivanje s vezivnom fazom pomaknutom u stranu od abrazijskog događaja. No jasno je da se često vezivna faza s kobaltom uklanja s površine tvrdog materijala, ostavljajući tako zrna od volframovog karbida izdignuta iznad površine i nepodržana u mehaničkom smislu. Primjer takvog uklanjanja vezivnog dijela može se vidjeti na slici 34.



Slika 34. Uklonjena vezivna faza abrazivskim trošenjem [27]

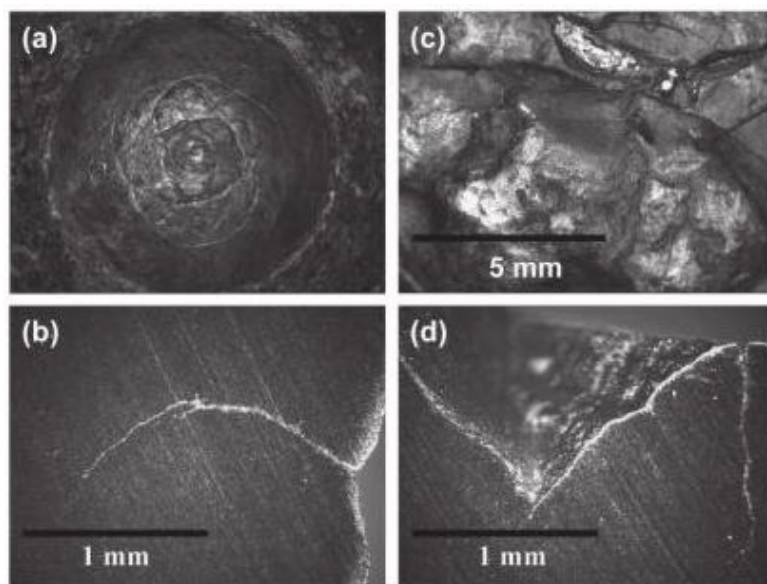
Kao posljedica abrazivskog trošenja mogu se pojaviti i pukotine na zrnima od volframovog karbida. Takve pukotine na kraju vode do gubitka zrna ili čak grupe zrna s površine tvrdog metala. Primjer pukotina zrna može se vidjeti na slici 35.



Slika 35. Pukotine na zrnima WC-a [29]

Proces obrade kamena dovodi do pojave visokih udarnih opterećenja, intenzivne abrazije i visokih temperatura u samom procesu rezanja koje rezultiraju temperaturnim šokovima i toplinskom zamoru materijala. Tako na primjer kod obrade kamena pješčenjaka dolazi do pojave vrlo visokih temperatura prilikom obrade te je čak moguće vidljivo iskrenje tijekom obrade što uzrokuje veliki toplinski stres na sam alat. To može dovesti do pojave toplinskih pukotina što je u dosta velikom slučaju važan mehanizam u propadanja alata. Slika 36 prikazuje stanje alata nakon toplinskog zamora i pojave pukotina. Na slici 36 pod oznakama a) i c) mogu se vidjeti toplinske pukotine na površini alata. Nakon daljnjeg korištenja dolazi do propagiranja takovih pukotina u unutrašnjost alata, oznaka b) i d) na slici 36. Takove pukotine dovode do propadanja i loma alata [30].

Stvaranje i progresija pukotina izazvanih toplinskih umorom ima više stadija. Tako na početku dolazi do pojave pukotina na površini materijala, a ne i u dubini, zbog naprezanja koja prekoračuju čvrstoću materijala. Nakon velikog broja udarca otpornost materijala na toplinski umor se sve više smanjuje i pukotine počinju prodirati u Co fazu. Čestice kamena se počinju naljepljivati na tu oštećenu površinu. Počinje stvaranje sve više pukotina, a dolazi i do pucanja WC zrna zbog djelovanja odvojenih čestica. Na određenoj temperaturi dolazi do pretvorbe vezivne faze odnosno kobalta iz FCC u HCP strukturu, koja je puno tvrđa te lakše puca pod utjecajem udarnim opterećenja i toplinskih naprezanja. Sada su pukotine već dosta vidljive i sve više materijala se pritiska u iste. Tu je moguća i pojava korozije kobalta. Dolazi do uklanjanja cijelih zrna WC što također utječe na vezivnu fazu. Alat ne može podnijeti veći unos energije pa se mnogo malih pukotina spaja u veliku i dolazi do pukotine koja uništava alat [10].



Slika 36. Pukotine zbog toplinskog naprezanja [7]

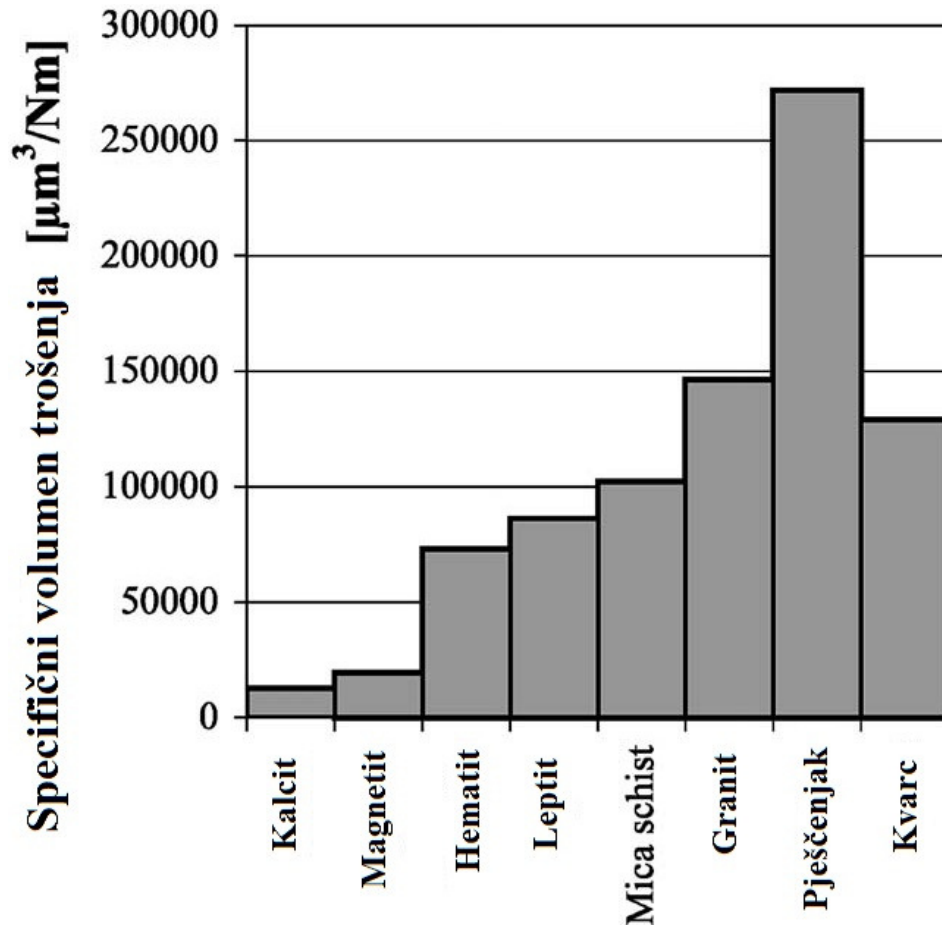
Kao što je to već i prije bilo napomenuto različite tvrdoće kamena različito utječu na trošenje alata od tvrdog metala. Tako se provodilo istraživanje [28] u kojem se usporedio utjecaj kamena različitih svojstava, odnosno tvrdoće, na trošenje alata od tvrdog metala. Na slici 37 mogu se vidjeti korišteni kameni i njihova svojstva te svojstva alata od tvrdog metala.

Materijal	Veličina zrna	Porijeklo	Sastav	Tvrdoća, HV, min-max-avg
Calcite	Large crystal	Gåsgruvan, Värmland <sup>a</sup>	CaCO <sub>3</sub>	20–190–230
ERS-magnetite	600–800 μm	Kiruna <sup>a</sup>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> + X <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	90–410–1460
Magnetite	50–200 μm	Kiruna <sup>a</sup>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	30–490–1280
Hematite	50–100 μm	Kiruna <sup>a</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10–550–1520
Leptite	50–100 μm	Vattholma, Uppland <sup>a</sup>	Complex	140–790–1340
Mica schist	200–300 μm	Switzerland	Complex	40–790–1430
Granite	100–700 μm	Uppsala <sup>a</sup>	Complex	200–800–1350
Sandstone	200–2000 μm	Mångsbodarna, Dalarna <sup>a</sup>	SiO <sub>2</sub>	20–1000–1630
Quartz	Large crystal	Råneå, Västerbotten <sup>a</sup>	SiO <sub>2</sub>	200–1220–2360
Cemented carbide	1 μm WC	CSEM Instruments SA	93% WC, 7% Co	1210

Slika 37. Svojstva ispitivanih kamena i alata od tvrdog metala [28]

Kameni tvrdoće manje od 490 HV, odnosno kalcit i obje vrste magnetita pokazali su veoma mali utjecaj na trošenje alata od tvrdog metala. Pošto je tvrdoća tih kamena bila puno manja u odnosu na tvrdoću volframovih karbida, pa čak i veziva od kobalta, koje ima tvrdoću nešto nižu od volframovih karbida, to jednostavno nije bilo dovoljno da ukloni vezivo od

kobalta, a niti da se oštete zrna od volframovog karbida. Tvrdoća vezivnog dijela od kobalta je oko 400 HV. Kako je potrebna tvrdoća abradiranog tijela barem 1,2 puta veća od tvrdoće materijala alata da bi se ostvarila puna abrazija, tvrdoća kamena bi zbog toga trebala biti veća od 480 HV kako bi se vezivni dio počeo trošiti. Usporedbe i rezultati trošenja mogu se vidjeti na slici 38 [28].



Slika 38. Usporedba volumena trošenja alata kod obrade različitih kamena [28]

Kameni tvrdoće od 550 HV do 790 HV, odnosno hematit, leptit i mica – schist, pokazuju sličan intenzitet trošenja alata. Kako ovi kameni imaju tvrdoću veću od tvrdoće vezivnog dijela tvrdog metala, dolazi do većeg abrazijskog trošenja i otkidanja kobalta iz veziva.

Sva tri najtvrdja kamena sastoje se od kvarca, samo u različitim udjelima. Kvarc je jedini mineral u ovom istraživanju koji ima tvrdoću veću od tvrdoće karbida. Pješčenjak ima veoma sitne čestice kvarca pa se rezna oštrica istrošila puno više jer je prolazila pokraj veoma oštrih rubova. Iako kvarc ima veću prosječnu tvrdoću od pješčenjaka trošenje oštrice je bilo manje jer nije prolazila kroz oštre rubove.



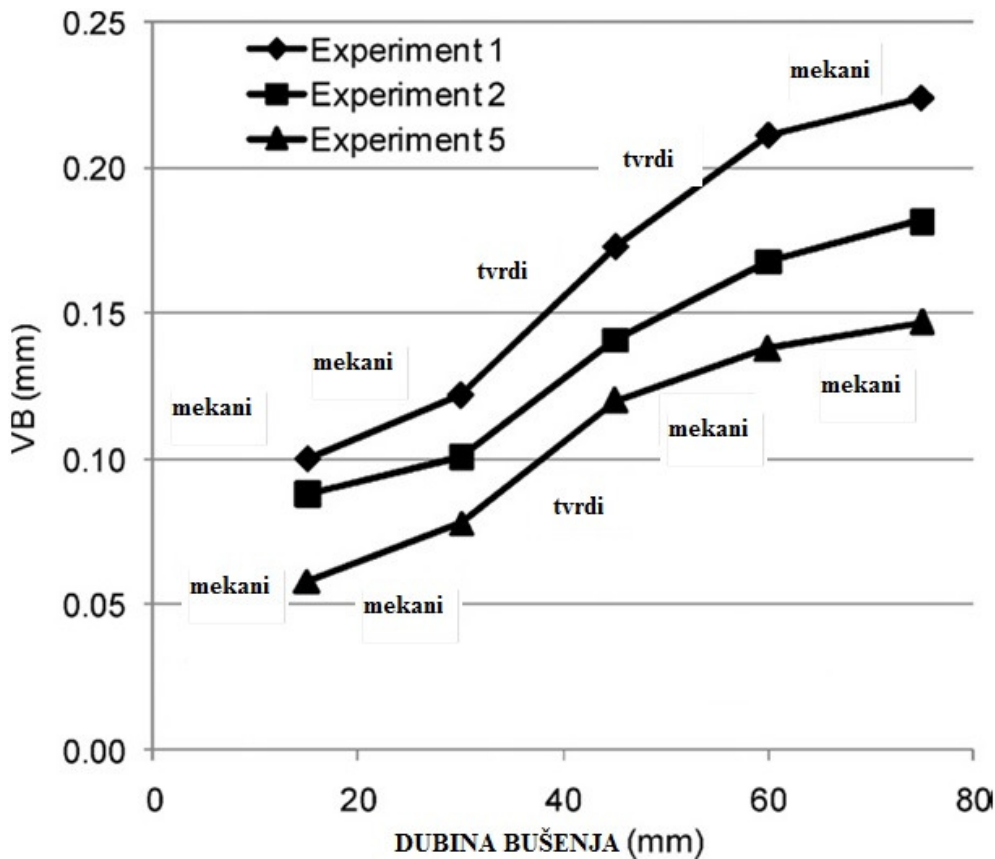
## 5.5. Utjecaj parametara obrade na sile i trošenje alata pri obradi kamena

Kako se zbog svoje izuzetno velike tvrdoće i otpornosti na trošenje uvelike koriste alati od PCD-a, na tržištu su se pojavile razne izvedbe ovakvih alata za uporabu kod obrade kamena. Iz prijašnjih testiranja [31] došlo se do zaključka kako se, odmakom od prvotnog „oštrog“ stanja alata prema istrošenom, također mijenjaju sile i momenti prilikom obrade. Uz to bi se još moglo dodati kako se prilikom obrade, zbog trenja između alata i obrađivanog materijala, javljaju visoke temperature koje zapravo u nekoj mjeri djeluju na kamen na način da ga omekšavaju. Stoga bi se tijekom obrade moglo pojaviti i snižavanje sila prilikom rezanja. No kako su utjecaji temperaturnih promjena na kamenu samo trenutni i nisu toliko izraženi kao utjecaj povišenih temperatura na sam proces trošenja alata, ipak dolazi do trajnog neželjenog efekta povećanja sila rezanja prilikom obrade.

U istraživanju [19] koje se provodilo kako bi se predvidjela progresija trošenja alata od PCD-a, koristili su se različiti uvjeti rezanja kao što su brzina rezanja, posmak alata, različiti kutovi namještanja alata te različite tvrdoće kamena koji se obrađivao. U istraživanju su se koristile dvije različite tvrdoće kamena. Podaci koji su se prikupljali trebali su poslužiti da se može relativno dobro odrediti:

1. Karakteristika progresije trošenja alata tijekom bušenja
2. Korelacija između kraterskog trošenja (VB, mm) i trošenja radijusa oštrice alata u funkciji čvrstoće obrađivanog kamena i parametara bušenja (posmak i brzina rezanja)
3. Matematički model kako bi se opisale varijable pod 2.
4. Matematički model koji bi opisivao odnos sila rezanja, trošenja alata, čvrstoće kamena i drugih varijabli u procesu rezanja

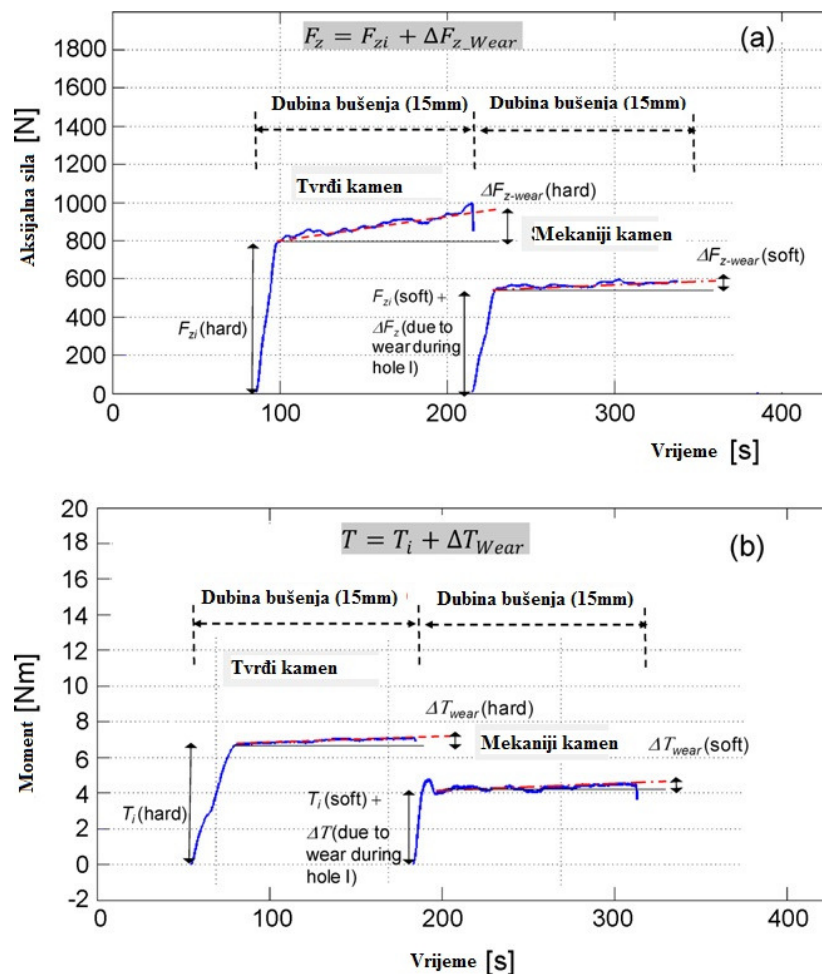
Na temelju provedenih istraživanja dobiveni su podaci koji su prikazani na sljedećim slikama.



Slika 39. Odnos kraterskog trošenja, različitih tvrdoća kamena i dubine bušenja [19]

Na slici 39 može se vidjeti utjecaj tvrdoće kamena i dubine bušenja na kratersko trošenje alata. Prikazana su tri eksperimenta s različitim uvjetima obrade. Kod eksperimenta 1 koristio se broj okretaja od  $60 \text{ min}^{-1}$  i posmak od  $0,01 \text{ mm/okretaju}$ . U eksperimentu 2 koristi se broj okretaja od  $100 \text{ min}^{-1}$  i posmak od  $0,025 \text{ mm/okretaju}$ . Eksperiment 3 proveden je s više negativnim kutom namještanja alata,  $-10^\circ$  u odnosu na  $-5^\circ$  kod prva dva eksperimenta i posmakom od  $0,025 \text{ mm/okretaju}$ . Redosljed rupa koji se bušio je izmijenjen pa su se tako bušile rupe u istom eksperimentu i s tvrdim i s mekanijim kamenom kako je prikazano na slici. Kako se može primijetiti iz odnosa prvog i drugog eksperimenta, na smanjenje trošenja alata, odnosno na smanjenu progresiju kraterskog trošenja pozitivno utječe povećanje brzine rezanja odnosno povećanje broja okretaja. Također, može se vidjeti kako se bušenjem tvrdog materijala nagib linija svakog eksperimenta povećava u odnosu na bušenje mekanijeg kamena pa se može zaključiti, kako se i pretpostavljalo, da tvrdoća obrađivanog materijala negativno utječe na trošenje alata. U slučaju eksperimenta 5 imamo najmanji iznos kraterskog trošenja što je posljedica drugačijeg kuta namještanja u odnosu na preostala dva eksperimenta [32].

Na sljedećoj slici može se vidjeti odnos tvrdoće kamena, dok su ostali uvjeti rezanja bili isti, i aksijalne sile (a), koja se javlja na alatu tijekom bušenja, te momenta (b).



Slika 40. Odnos tvrdoće kamena i aksijalne sile (a) odnosno momenta (b) [31]

Slika 40 prikazuje generirane sile i momente stvorene prilikom obrade dvaju kamena različitih tvrdoća dok su ostali parametri obrade jednaki u oba slučaja. Tvrdoća tvrdog kamena je 350 MPa dok je tvrdoća drugog 240 MPa. Iz slika se može zaključiti kako na početku bušenja novim alatom dolazi do puno većeg iznosa sile i momenta kada se buši tvrdi u odnosu na mekaniji kamen. Također, nakon prvotnog bušenja dolazi do trošenja alata te se sile i momenti povećavaju manjim intenzitetom s time da se sila povećava primjetnije što onda može poslužiti kao bolji indikator trošenja alata u odnosu na moment. Takvo ponašanje linearnog povećanja sile je u skladu s istraživanjima koja su pokazala da je kod bušenja kamena, kada imamo nametnutu aksijalnu silu na alatu npr. pomoću utega, potrebno tu silu povećavati kako bi se mogao zadržati isti specificirani posmak alata. Također se primjećuje kako se sila i moment intenzivnije povećavaju kod tvrdog kamena.

## 6. NADZOR OBRADNIH STROJEVA I PROCESA

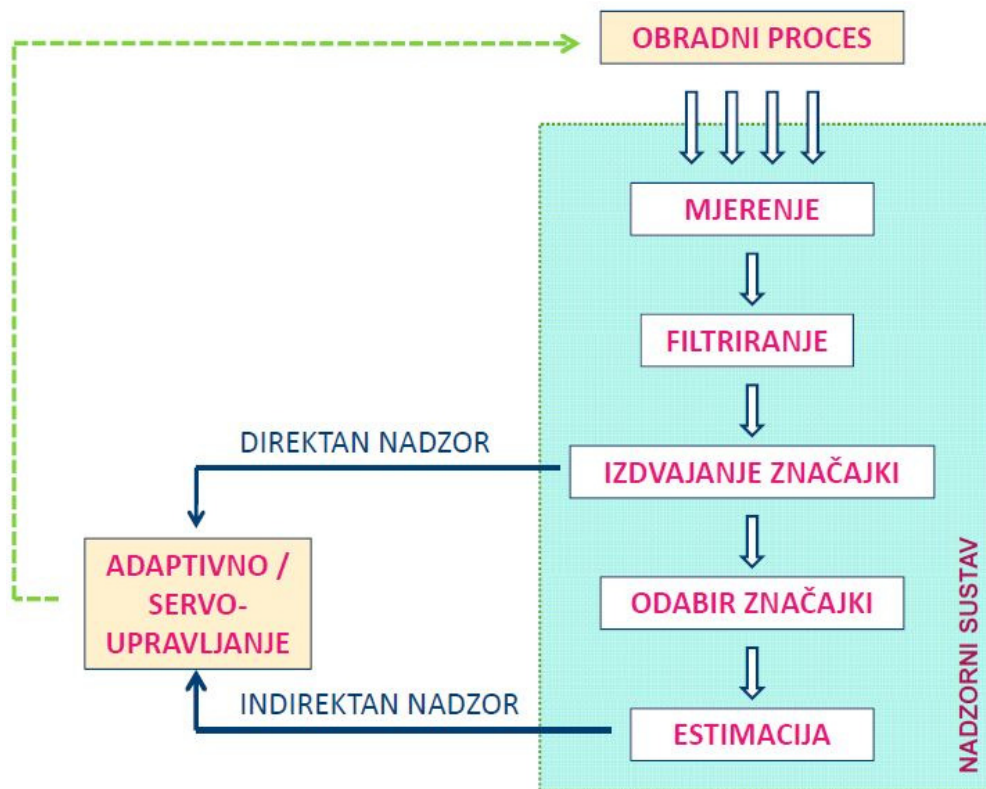
Procjena istrošenosti alata i detekcija loma se smatraju generalno jednim od najvažnijih problema u modernoj obradi odvajanjem čestica CNC strojevima. Implementacija pouzdanog sustava nadzora omogućila bi slanje podataka o stanju alata u CNC upravljačku jedinicu s ciljem upotrebe prikladnih parametara procesa obrade. Kao rezultat postigla bi se veća razina automatizacije obradnog stroja s nekoliko važnih beneficija, kao što su [33]:

- Smanjenje ili sprečavanje prekida rada zbog loma alata
- Izbjegavanje nedovoljne ili pretjerane upotrebe alata prije promjene alata
- Uvelike smanjena potreba ponovne obrade zbog veće točnosti i kvalitete izrade
- Sustav nadzora alata neophodan je u proizvodnji bez čovjeka i fleksibilnoj automatiziranoj proizvodnji
- Moguća optimizacija parametra procesa u cilju povećanja životnog vijeka alata, optimalne potrošnje energije ili povećanja produktivnosti

Funkcija nadzornog sustava je brza i precizna identifikacija stanja stroja, alata i/ili obradka u cilju postizanja visokog stupnja autonomnosti, pouzdanosti, robusnosti, fleksibilnosti i produktivnosti obradnih strojeva odnosno izrada što konkurentnijeg, tj. jeftinijeg i kvalitetnijeg proizvoda. Od sustava nadzora se također očekuje da povećaju i sigurnost obradnog procesa u cilju sprječavanja incidenata ili brze reakcije u slučaju njihove pojave. Implementacija i razvoj sustava nadzora predstavlja jedan od nužnih elemenata u razvoju adaptivnih CNC sustava upravljanja koji predstavljaju slijedeći korak u automatizaciji obradnih strojeva [33].

Primjena sustava za nadzor obradnih strojeva i procesa u zadnjih 25 godina postaje sve više pravilo, a sve manje izuzetak. Do tada su strojevi nadgledani isključivo od strane operatera. Prvi komercijalni sustavi pojavljuju se krajem 70-ih godina prošlog stoljeća u avionskoj industriji i to kao sustavi za nadzor kritične istrošenosti alata. Istrošenost alata određivana je na temelju progiba (deformacija) motorvretena koje se javlja pri većim oštećenjima oštrice, a rezultat je bio zaustavljanje stroja prije loma alata. Ta prva rješenja su bila potpuno integrirana u strukturu stroja i potpuno orijentirana identifikaciji visoke istrošenosti alata. Procijenjena ušteda je iznosila 3-5% ukupnih proizvodnih troškova. Ograničenja ovakvih sustava su bila nefleksibilnost i fokusiranost samo na alatni stroj, bez

utjecaja na kvalitetu proizvoda i poboljšanje cjelokupnog proizvodnog procesa. Sredinom 90-ih započine intenzivniji razvoj i primjena sustava za nadzor, posebice u automobilske industriji kojoj je imperativ bio smanjiti visoke troškove zastoja, škarta i popravaka. Današnji se razvoj zasniva na modularnoj platformi koju je moguće u potpunosti integrirati s upravljačkim sustavom stroja, većem broju parametara nadzora i sve kvalitetnijoj elektronici [34].



Slika 41. Elementi nadzornog sustava [34]

Na mjerne se sustave postavlja niz zahtjeva s obzirom na konstrukciju definirane značajke alata i stroja te karakteristike obrade. Oni bi trebali zadovoljiti slijedeće kriterije:

- visok stupanj osjetljivosti u različitim uvjetima obrade,
- veliku otpornost na nečistoće, čestice odvojene rezanjem, te mehaničke, elektromagnetske i toplinske utjecaje,
- mogućnost prigušenja šumova,
- jednostavnu građu uz malu potrebu za održavanjem i
- jednostavnu integraciju u postojeće strukture obradnih strojeva.

Uz navedene karakteristike, njihova ugradnja ne bi smjela utjecati na konstrukcijom definirane karakteristike stroja u smislu smanjenja njegove statičke, odnosno dinamičke krutosti i radnog prostora [34].

U principu, metode nadzora trošenja alata mogu se podijeliti u skupinu direktnih i indirektnih metoda.

### **6.1. Direktne metode nadzora**

Direktnim metodama moguće je direktno odrediti istrošenost alata što znači da se tim metodama stvarno mjeri istrošenost alata kao takva. Nedostatak ovakvih načina mjerenja istrošenosti bila bi velika osjetljivost na utjecaj različitih elemenata u procesu obrade odvajanjem čestica, kao što su odvojena čestica te sredstva za hlađenje i podmazivanje. Ovakve metode nerijetko zahtijevaju kompliciranu instalaciju, a imaju i relativno visoku cijenu. Većina direktnih metoda spada u skupinu takozvanih prekidnih ili "off-line" metoda mjerenja što znači da se primjenjuju kada alat nije u zahvatu, a to rezultira kašnjenjem u određivanju stupnja istrošenosti alata. Usprkos mnogim pokušajima, direktne metode nadzora se još nisu dokazale kao ekonomično i tehnički prihvatljivo rješenje nadzora [35]. Industrijska primjena ovakvih metoda je znatno limitirana prethodno navedenim poteškoćama pa se takvi sustavi uglavnom primjenjuju u istraživanjima kao podrška indirektnim mjernim metodama. Kao najčešće metode direktnog nadzora alata mogu se izdvojiti vizijski sustavi temeljeni na CCD kamerama, fotodiode, senzori s optičkim vlaknima, senzori za određivanje količine i koncentracije čestica istrošenog materijala oštrice alata u SHIP-u, LVDT, mikrometri, i sl.

### **6.2. Indirektna metoda nadzora**

Za razliku od direktnih metoda gdje se varijable procesa dobivaju direktno iz izmjerenih signala procesa, kod indirektnih metoda se iz signala izdvajaju njihove značajke definirane u vremenskom ili frekvencijskom području na temelju kojih se onda estimira vrijednost razmatrane varijable procesa. Kod indirektnih metoda procjena stupnja istrošenosti alata vrši se tijekom procesa obrade pa ovakvi načini nadzora alata spadaju u takozvane "on-line" metode mjerenja te se samim time omogućava promjena parametara tijekom samog izvođenja procesa obrade. Kako se kod ovakvih načina mjerenja trošenje ne mjeri direktno već posredno putem različitih parametara procesa, potrebno je iz signala izlučiti različite značajke trošenja pomoću kojih bi se zatim mogao procijeniti stupanj istrošenosti alata. Za razliku od direktnih metoda instalacija uređaja za indirektnan način mjerenja je jednostavnija,

no često je potrebna vrlo zahtjevna obrada signala. Zbog ovih značajki danas su indirektne metode nadzora trošenja alata najčešći izbor u razvoju automatiziranih sustava nadzora trošenja alata [36].

U nadzoru trošenja alata vrlo se često koriste signali iz više različitih senzora kao što su senzori sila, vibracija, senzori akustične emisije ili senzori struja glavnih i posmičnih prigona. Signali iz senzora se najprije moraju obraditi i procesirati kako bi se iz njih mogle izvući potrebne značajke koje su u korelaciji s istrošenosti alata. Te značajke se zatim analiziraju prikladnim algoritmima kako bi se mogao procijeniti stupanj istrošenosti alata s empirijski određenim korelacijama. Glavni razlog za višesenzorski pristup je potencijalno pouzdanija procjena istrošenosti alata koja se ne bi mogla izvršiti primjenom samo jedna vrste signala odnosno senzora. Iako su indirektne metode generalno manje precizne od direktnih metoda, imaju veliku prednost zbog neprekidnog nadzora i manje komplicirane instalacije. Upravo zato se takve metode puno više koriste u industrijskoj primjeni [33].

Najčešći uređaji koji se koriste za direktni nadzor trošenja alata su dinamometri u obliku ploča, na koje se pričvršćuje obradak, ili prstenasti za mjerenje momenta glavnog vretena, senzori sila (naprezanja) na alatu ili na (u) držaču alata, senzori sila ugrađeni u ležajeve, senzori akustične emisije, akcelerometri, signali struja glavnog i posmičnih pogona. Najčešće korišteni mjerni signali koji se koriste za indirektne metode nadzora alata su signali sila rezanja, akustične emisije i vibracije. Prednost ovakvih signala je u njihovoj visokoj međusobnoj korelaciji, niskim troškovima i jednostavnoj eksploataciji.

### **6.3. Mjerenje signala sila i momenata**

Bilo koja obrada rezanjem zahtjeva određenu silu kako bi se stvorila odvojena čestica. U praksi se zna da se sile rezanja povećavaju kako se povećava stupanj istrošenosti alata. To se događa zbog povećanja trenja između alata i obradka. Zbog toga se signali sila vrlo ekstenzivno koriste za nadzor trošenja alata. Senzori momenata se, kao i senzori sila, sastoje od mehaničke strukture koja reagira na deformaciju, ali je u ovom slučaju naprezanje torzijsko. Senzori sila i momenta koriste elastične elemente kojima se kod djelovanja opterećenja mijenjaju dimenzije, a ta promjena se zatim registrira kao promjena potencijala odnosno napon. Ovakve vrste senzora nazivaju se piezoelektrični senzori sila [37]. Piezoelektrični efekt nastaje pri naprezanju kristaličnih materijala (kristala, nekih vrsta keramike i sl.), pri čemu dolazi do stvaranja električnog naboja proporcionalnog sili koja djeluje na senzor.

#### **6.4. Mjerenje struje glavnih i posmičnih motora**

Mjerenjem struja glavnog i posmičnog motora moguće je ostvariti indirektno mjerenje momenta i sila rezanja te snage koje ostvaruje alatni stroj. Struja glavnog motora proporcionalna je rezultirajućoj sili rezanja i momentu, dok struje posmičnih motora su u bliskoj povezanosti s posmičnim silama. Zbog toga su metode nadzora struja motora dosta česti oblik nadzora trošenja alata te imaju primjenu u industriji. Glavna prednost ovakvog pristupa je da proces rezanja nije ometan sustavom mjerenja. Još jedna prednost ovakvog sustava je u tome da se signali struja mogu dobiti i direktno iz upravljačkog sustava servo motora što bi moglo značiti način mjerenja praktično bez senzora. Ovakav način mjerenja manje je precizan u usporedbi s mjerenjem sila zbog toga što signali struje, osim informacija o procesu rezanja, sadrže i dinamiku motora i pogonskog sustava te ovise o temperaturi koja se pojavljuje u motoru tijekom procesa obrade kao i stanju podmazivanja. Mjerenja struje su se pokazala pouzdanim u nadzoru trošenja alata kod srednje teških procesa rezanja [33].



## 6.5. Sustav praćenja procesa obrade

Jedan od najvažnijih problema u suvremenoj CNC obradnoj tehnologiji je procjena istrošenosti alata i detekcija loma ili puknuća alata. Osiguravanjem sistema koji će pratiti istrošenost alata i mogućnost loma te slati te informacije u upravljačku jedinicu moći će se poduzeti određene mjere za sprečavanje loma i kontrolu trošenja alata. Na temelju toga moći će se razviti viši stupanj automatizacije procesa. Takav automatizirani sustav mogao bi spriječiti puknuća alata koja bi mogla oštetiti stroj i obradak te prebrzo trošenje alata, a samim time bi se smanjilo, ili čak i uklonio, prekid rada stroja. To je veoma važno s ekonomskog stajališta jer trošak vremena u kojem stroj stoji može biti prilično značajan u odnosu na samu cijenu alata. Sistemom praćenja alata moći će se osigurati da alat ne radi u području izvan idealnih parametara i na taj način povećati produktivnost. Također, smanjio bi se broj škarta i broj komada koji se moraju prepravljati. Kontroliranjem uvjeta rezanja mogao bi se maksimalno produljiti životni vijek alata, povećati produktivnost i odrediti optimalna potrošnja energije [33].

Na mjerne se sustave postavlja niz zahtjeva obzirom na konstrukcijom definirane značajke alata i stroja te karakteristike obrade. Oni bi trebali zadovoljiti slijedeće kriterije [34]:

- visok stupanj osjetljivosti u različitim uvjetima obrade,
- veliku otpornost na nečistoće, čestice odvojene rezanjem, te mehaničke, elektromagnetske i toplinske utjecaje,
- mogućnost prigušenja šumova,
- jednostavnu građu uz malu potrebu za održavanjem i
- jednostavnu integraciju u postojeće strukture obradnih strojeva.

Uz navedene karakteristike, njihova ugradnja ne bi smjela utjecati na konstrukcijom definirane karakteristike stroja u smislu smanjenja njegove statičke, odnosno dinamičke krutosti i radnog prostora.

Obzirom na način određivanja (kvantificiranja) varijabli procesa, mjerne metode mogu se podijeliti na:

1. indirektna (npr. dinamometri u obliku ploča na koje se pričvršćuje obradak ili prstenasti za mjerenje momenta glavnog vretena, senzori sila (naprezanja) na alatu ili na (u) držaču

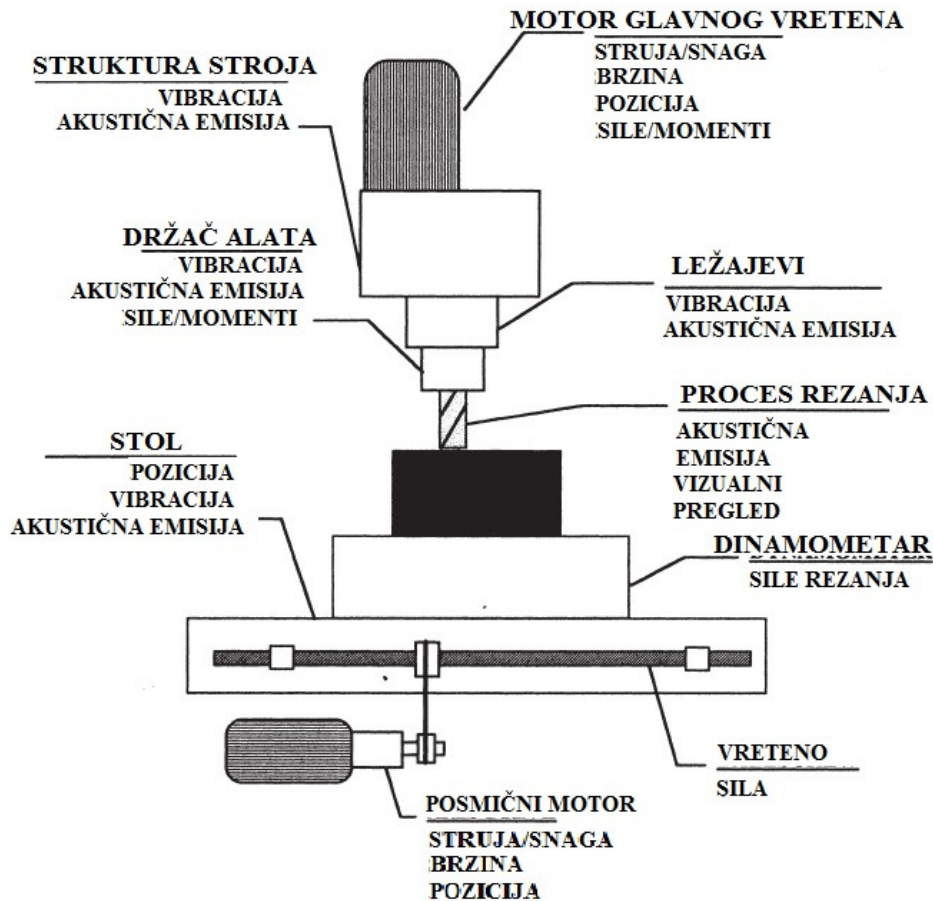
alata, senzori sila ugrađeni u ležajeve, senzori akustične emisije, akcelerometri, signali struja glavnog i posmičnih pogona, ... ) i

2. direktne (npr. vizijski sustavi temeljeni na CCD kamerama, fotodiode, senzori s optičkim vlaknima, senzori za određivanje količine i koncentracije čestica istrošenog materijala oštrice alata u SHIP-u, LVDT, mikrometri, ...).

## **6.6. Senzori**

U obradi odvajanjem čestica primjenjuju se različite metode za nadzor i kontrolu procesa, ali glavni izvori nadzora su signali dobiveni iz različitih senzora. Senzori pretvaraju određenu fizikalnu veličinu u drugu (silu, zvučnu emisiju ili vibraciju u električni signal). Senzori ugrađeni u konstrukciju moraju biti podržani dodatnom opremom za analizu i primanje signala s adekvatnim sustavom procjene. Dodatna oprema mora se prilagoditi određenom stroju i postupku obrade. S tehničkog aspekta povezivanje vanjskih sustava i upravljačkog sustava stroja uvijek donosi određene poteškoće pa tako postoje i određeni nedostaci u korištenju konvencionalnih sustava nadzora kao što su [38]:

- potreba za dodatnim uređajima i sensorima i njihova prilagodba stroju,
- dobra iskoristivost sustava tek nakon dobre pripreme procesa
- održavanje sustava nadzora i definiranje parametara je zahtjevno i komplicirano
- pojava poremećaja u procesu



Slika 42. Mogućnosti nadzora obrade s više senzorskim sustavom [39]

Nužan je pristup s više senzora s prihvatom i obradom signala u realnom vremenu u sklopu otvorene upravljačke strukture stroja. Iz navedenog proizlazi i potreba za nadogradnjom postojećih upravljačkih jedinica novim računalnim komponentama manjih dimenzija i veće procesorske i memorijske snage. Među najčešće korištenim mjernim signalima izdvajaju se signali sila rezanja, akustične emisije i vibracija. Uz signale sila često se ističu i prednosti pogonskih signala (jakosti struja, snaga) u smislu njihove međusobne visoke korelacije, niskih troškova i jednostavne eksploatacije [36].

## 6.7. Senzori sila

Direktno mjerenje sile ostvaruje se specijalnim uređajima koji se zovu dinamometri. Rad dinamometara može biti zasnovan na različitim principima. Dinamometri prema principu rada mogu biti:

- mehanički,
- električni,
- hidraulični,
- pneumatski

Za mjerenje sile mogu se koristiti različite vrste pretvarača, a najčešće:

- tenzometarske mjerne trake,
- induktivni pretvarači,
- kapacitivni pretvarači,
- piezoelektrični pretvarači

Najčešći senzori sile koji se koriste u obradi odvajanjem čestica su piezoelektrični senzori sila. Tehnologija rada zasniva se na principu piezoelektričnog svojstva određenih materijala. Ti materijali su piezoelektrične keramike, piezoelektrični polimeri i pojedinačni kristali, odnosno kvarc, koji se i najčešće upotrebljava. Izvjesni dielektrični materijal monokristalne strukture, kada se mehanički napreže, razvija električni potencijal. Ako se na materijal koji ima ove osobine djeluje silom  $F$  kristalna rešetka će se deformirati. Uslijed deformacije rešetke javit će se piezoelektricitet, čiji napon se mjeri na elektrodama postavljenim na površine kristala. Količina elektriciteta zavisi od sile kojim se rešetka deformira:

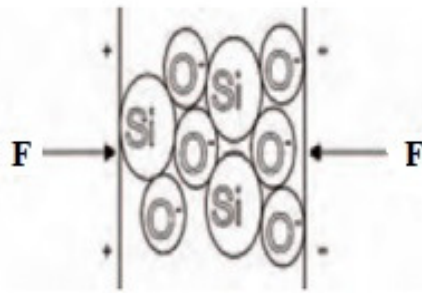
$$Q = d \cdot F \quad (3.1)$$

gdje je:

$Q$  – količina naboja, C

$d$  – konstanta kristala

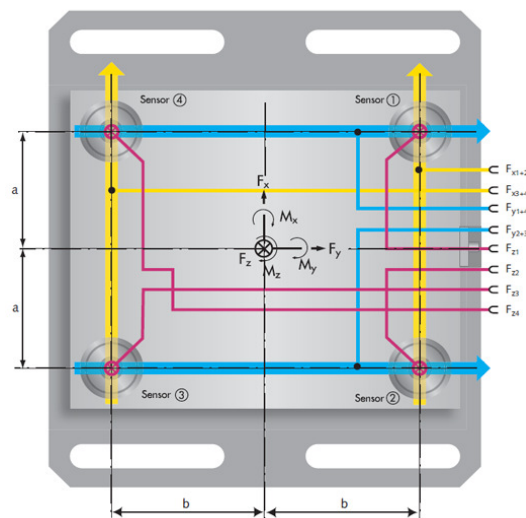
$F$  – primijenjena sila, N



Slika 43. Piezoelektrični efekt kristala kvarca

Kristal kvarca senzora piezoelektrične sile generira elektrostatički naboj samo kada sila djeluje ili se uklanja sa senzora. Drugim riječima, ako primijenimo statičku silu na senzor piezoelektrične sile, izlazno generirani naboj na početku će eventualno „iscuriti“ i izlaz senzora će konačno biti vraćen na nulu. Zbog toga se u sustav moraju staviti određene komponente, kao na primjer kondenzator, koje će spremiti naboj koji kristal kvarca stvori čak i kada se prestane mijenjati iznos opterećenja na kristalu kvarca. Prednosti kvarcnih senzora sila su visoka krutost, a time i visoka rezonantna frekvencija, minimalna promjena oblika (svega nekoliko mikrometara pod punim opterećenjem), visoki raspon mjerenja, linearna karakteristika, kompaktni dizajn i jako dugi vijek trajanja.

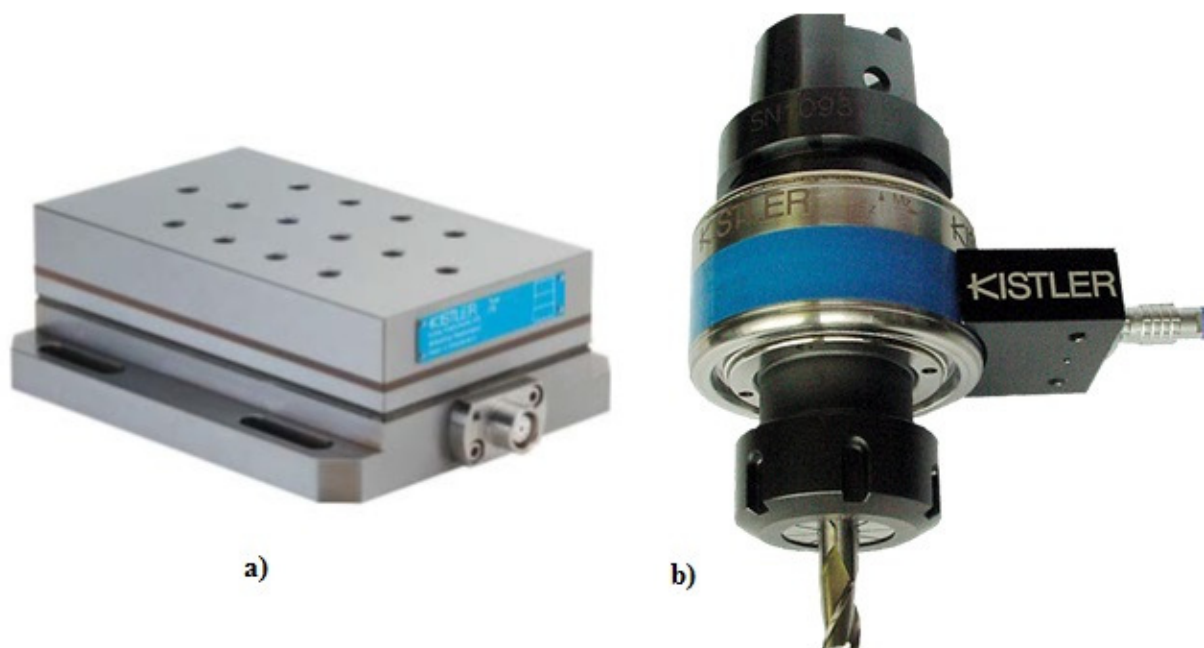
Piezoelektrični senzori sila mogu biti jednokomponentni i višekomponentni. Jednokomponentni senzori se koriste za mjerenje sile u samo jednom smjeru. Višekomponentni senzori koriste se za mjerenje sila u više smjerova odnosno osi. Postoje senzori koji istovremeno mogu mjeriti smjer sila u osi x, y, z, ali i momente oko različitih osi. Primjer jednog takvog višekomponentnog senzora sila može se vidjeti na slici 45.



Slika 45. Višekomponentni senzor sile [40]

Senzori ili dinamometri za mjerenje sila rezanja su kompaktne jedinice koje snimaju sile, a ponekad i momente. Iskorištavaju piezoelektrični efekt kako bi pribavili visoko dinamične signale. Ovi kompaktni dinamometri su idealni za uporabu pod teškim radnim uvjetima koji se mogu pojaviti na stroju.

Obzirom na način pozicioniranja, senzori mogu biti statički i rotacijski. Statički senzori sila su uobičajeno pričvršćeni na postolje stroja kako bi snimali sile koje se pojavljuju prilikom obrade. Kod statičkog senzora obradak se postavlja na senzor tako da se statički senzori uglavnom upotrebljavaju kod tokarenja, glodanja i bušenja. Rotacijski senzori se najčešće koriste kod obrada u kojima alat izvodi glavno gibanje, a to su glodanje i bušenje. Rotacijski senzori se montiraju direktno na glavno vreteno, a alat se zatim montira na rotirajući senzor. Prednost rotacijskog senzora je u tome što nije ovisan o masi i obliku obratka. Može se mjeriti moment vretena, natražna sila te sile  $F_x$  i  $F_y$ . Specifičnost ovih senzora je u tome da određeni dijelovi senzora rotiraju zajedno s vretenom i alatom [40]. Primjeri višekomponentnih senzora sila mogu se vidjeti na slici 46.



**Slika 44. Primjeri višekomponentnih senzora sila: a) statički senzor sile (KISTLER type 9257B) b) rotacijski senzor sile (KISTLER type 9125A) [40]**

## 6.8. Obrada signala

Obrada signala je jedan od vitalnih aspekata mjerenja sila i momenta prilikom obrade. Piezoelektrični dinamometri ili senzori stvaraju naboj proporcionalan iznosu opterećenja. Jednostavno rješenje u svakom sustavu su različiti uređaji za pred obradu odnosno kondicioniranje signala te pojačalo, svaki posebno dizajniran za određeni tip senzora. Ovi elementi su robusno izgrađeni, električni izolirani i nalaze se u zatvorenoj kutiji. Kabeli koji se odvođe od senzora su zaštićeni. Na taj način su senzori, kabeli i uređaji za obradu signala zaštićeni od teških uvjeta koji se mogu pojaviti tijekom obrade na stroju i u njegovoj okolini [41].

Elementi za pred obradu signala pretvaraju izlazni signal senzora u oblik prikladan za daljnju obradu (istosmjerni napon, istosmjerna struja ili frekvencija). Najvažniji elementi za pred obradu su mjerni mostovi i pojačala.

Pojačala su neophodna za pojačavanje signala malih vrijednosti na vrijednosti prikladne za dalju obradu. Osnovni element pojačala signala je integrirano operacijsko pojačalo koje se odlikuje visokim pojačanjem i izvodi se tako da može pojačavati signale u širokom rasponu frekvencija. Operacijskom se pojačalu dodaje pasivna mreža koja određuje dinamička i statička svojstva pojačala [41].

Iz pojačala signal odlazi u jedinicu za prikupljanje mjernih podataka. Ova jedinica povezana je s računalom preko USB sučelja, a na računalu je instaliran program za prikupljanje i obradu podataka mjerenja.



Slika 45. Primjer toka i obrade signala iz senzora sila [40]

## **7. EKSPERIMENTALNI DIO**

U eksperimentalnom dijelu ovog rada bilo je potrebno istražiti trošenje dvaju svrdla različitih geometrija i strukture materijala rezne pločice. Bušenjem provrta u tri različita kamena, s različitim parametrima procesa, pratila se vrijednost sile u posmičnom smjeru, struja motora za posmično gibanje u smjeru osi z kao i struja motora glavnog vretena. Između određenog broja mjerenja kamerom se snimila oštrica svrdla kako bi se direktnom metodom utvrdilo trošenje alata. S tim podacima bilo je potrebno utvrditi utjecaje različitih parametara procesa na silu i struje motora, a samim time i pokušati procijeniti stupanj istrošenosti kao funkciju sila rezanja i struje motora.

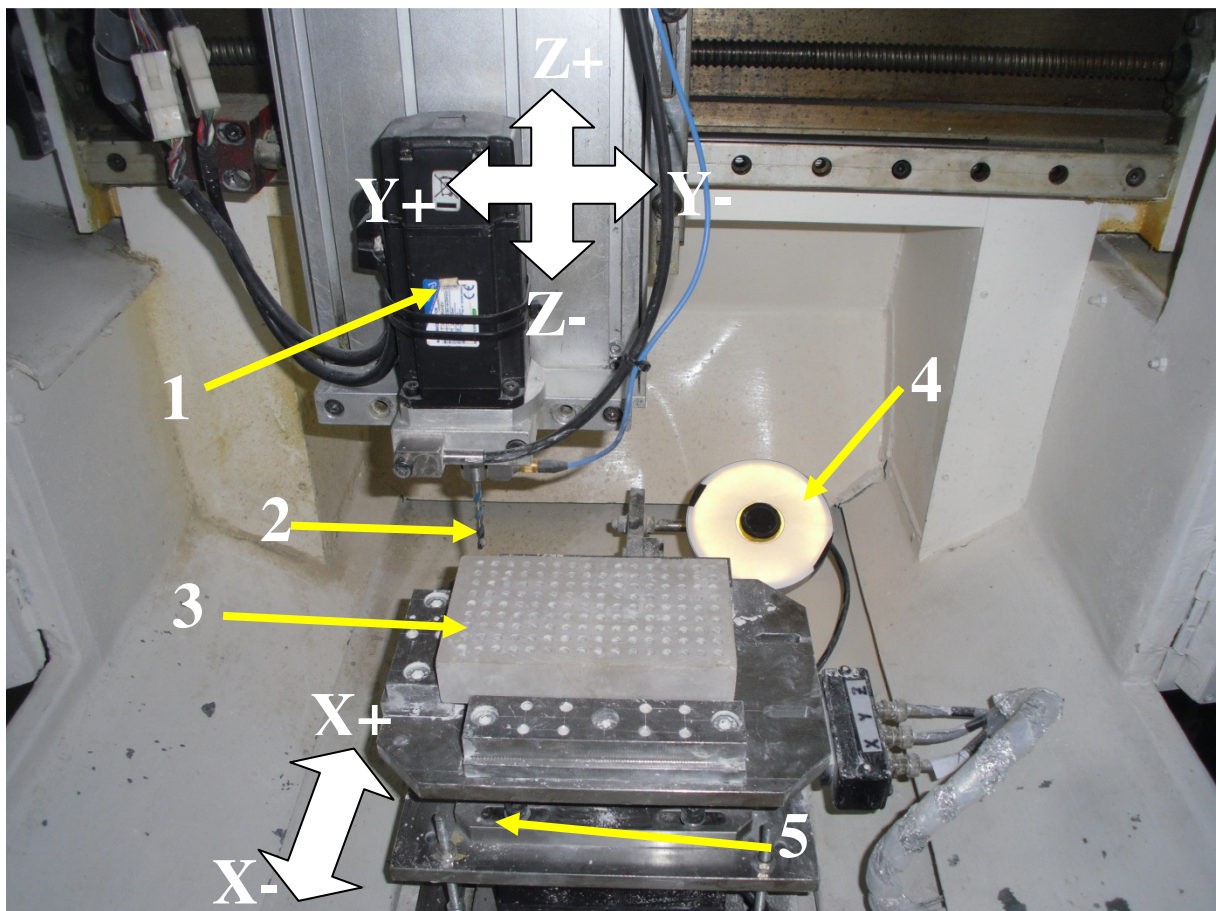
### **7.1. Alat**

Alati koji su se koristili u ispitivanju bili su dva svrdla, istog promjera od 5 mm. Svrđlo s oznakom "A1" ima vršni kut oštrice  $118^\circ$ , dok drugo svrdlo, označeno s "A2" ima vršni kut od  $116^\circ$ . Materijal reznih pločica svrdla je tvrdi metal, ali postoji razlika u strukturi materijala. Točan podatak o strukturama tvrdog metala nije dobiven od strane proizvođača svrdla.



## 7.2. Postav za ispitivanje

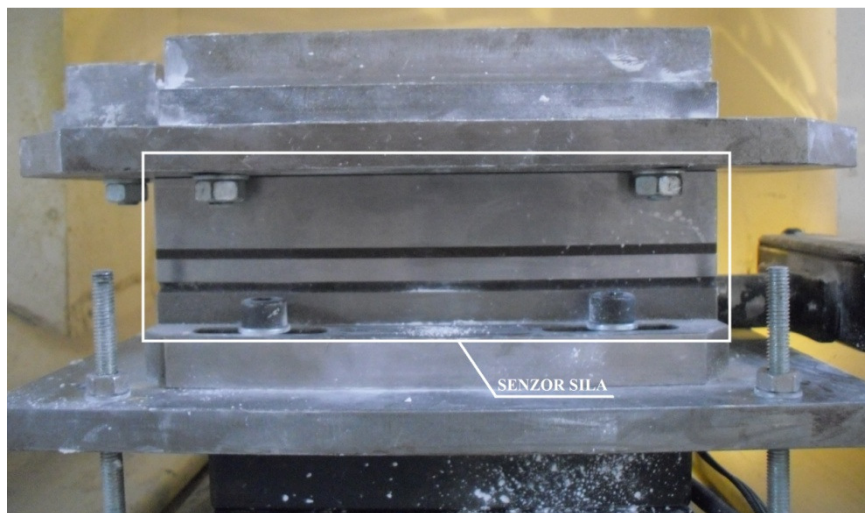
Eksperimentalni dio ovog rada provodio se u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Cilj ispitivanja bio je utvrditi utjecaj geometrije, materijala oštrice svrdla i parametara obrade na trošenje oštrice pri bušenju kamena. Istraživanje se provodilo na ispitnom postavu, koji se može vidjeti na slici 46. Postav se sastoji od troosne numerički upravljane glodalice, senzora za mjerenje sila i senzora za mjerenje struja glavnog i posmičnog motora zajedno s pripadajućom opremom za obradu signala, računala za upravljanje obradnim strojem i prikazivanje podataka o procesu obrade i rezultata mjerenja.



Slika 46. Troosna numerički upravljana glodalice. (1) Motor za glavno gibanje; (2) Svrdlo; (3) Obradak; (4) Kamera; (5) Senzor sila

### 7.3. Mjerni sustav

Senzor sile korišten za mjerenje sile u pomičnom smjeru je piezoelektrični trokomponentni senzor sile oznake 9257B tvrtke KISTLER Holding AG. Senzor ima mogućnost mjerenja sile u smjeru osi x, y i z. Senzor ima mogućnost mjerenja sile od -5 do 10 kN. Kako se sastoji od više senzora moguće je i mjerenje momenta. Senzor sile nalazi se ispod stezne naprave i pričvršćen je na pomičnu "X" os stroja. Na senzor sile pričvršćen je uređaj za stezanje obradaka te je tako omogućeno mjerenje sile u bilo kojoj poziciji i trenutku obrade.



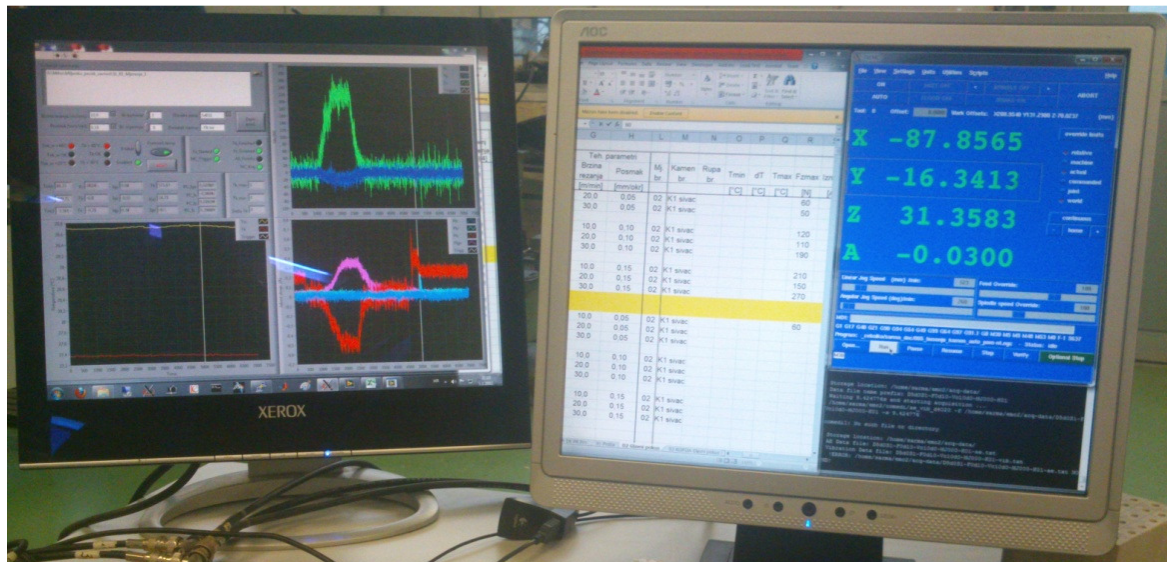
Slika 47. Senzor sile 9257B

Piezoelektrični senzori tijekom mjerenja stvaraju električni naboj u proporciji s nametnutim opterećenjem pa je potrebno koristiti nabojno pojačalo koje taj naboj pretvara u proporcionalni naponski signal. Pojačalo koje se koristilo sa senzorom sile također je proizvod tvrtke KISTLER Holding AG, a oznaka mu je 5017B.



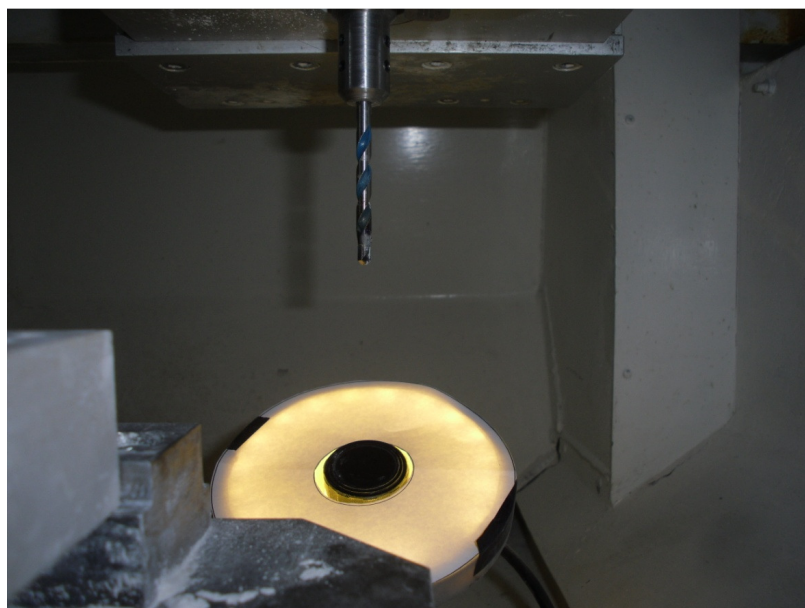
Slika 48. Nabojno pojačalo 5017B

Na glavnom upravljačkom računalu, koje je povezano s numerički upravljanim glodalicom i nabojnim pojačalom, podešavali su se parametri obrade te se ostvarivao prikaz rezultata mjerenja sila i struja glavnog motora.



**Slika 49. Prikaz podataka mjerenja i određivanje parametara obrade**

U sam postav stroja uključena je i kamera koja se koristila za snimanje oštrice svrdla nakon određenog broja izbušenih provrta. Nakon izbušenog određenog broja provrta svrdlo se pomaknulo u poziciju za slikanje oštrice. Svaka oštrica svrdla slikala se pod kutem od  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ , kako bi se dobio što bolji uvid u trošenje oštrice. Pozicija alata za snimanje i kamera mogu se vidjeti na slici 50.



**Slika 50. Pozicija alata za snimanje oštrice**

#### 7.4. Parametri obrade

U svrhu ispitivanja koristile su se tri različite vrste kamena u kojima su se izrađivali provrta s dva svrdla od različitog materijala i različite geometrije. Za sam proces bušenja koristilo se devet različitih parametara obrade. Parametri obrade prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Parametri obrade

Dubina provrta, mm	Brzina rezanja, $v_c$ , m/min	Posmak, $f$ , mm/okretaju	Broj okretaja, $n$ , min <sup>-1</sup>	Posmična brzina, $v_f$ , mm/min
15	10	0,03	636,62	19,1
	15	0,03	954,93	28,6
	20	0,03	1273,24	38,2
	10	0,06	636,62	38,2
	15	0,06	954,93	57,3
	20	0,06	1273,24	76,4
	10	0,09	636,62	57,3
	15	0,09	954,93	85,9
	20	0,09	1273,24	114,6

#### 7.5. Proces ispitivanja

Prije samog početka bušenja kamena snimile su se obje oštrice pojedinog svrdla. Nakon snimanja počeo je proces bušenja. Proces bušenja se odvijao pod različitim režimima obrade i različitim kamenima i to na način da su se nakon svakog izbušenog provrta mijenjali i brzina rezanja i posmak kao i materijal obrade odnosno kamen. Tijekom svakog bušenja zapisivala se vrijednost sile u posmičnom smjeru, a isto tako i iznos struje glavnog motora. Nakon bušenja određenog broja provrta opet se odradio postupak snimanja reznih oštrica. Nakon obavljenih postupaka mjerenja i snimanja sila i struja počeo je proces trošenja alata. Proces se obavljao na način da se odabrao jedan parametar obrade i određeni uzorak kamena na kojem je bilo potrebno izbušiti što više provrta i pritom snimati stanje oštrica. Kada se došlo do zadovoljavajućeg stupnja istrošenosti alata završio je proces trošenja. Nakon trošenja bilo je potrebno, opet kao i na početku ispitivanja, provesti mjerenja sile u posmičnom smjeru i struja glavnog motora na različitim uzorcima kamena te s različitim, prethodno određenim, parametrima obrade. Kao i kod prvog procesa mjerenja i procesa trošenja i tu je bilo potrebno

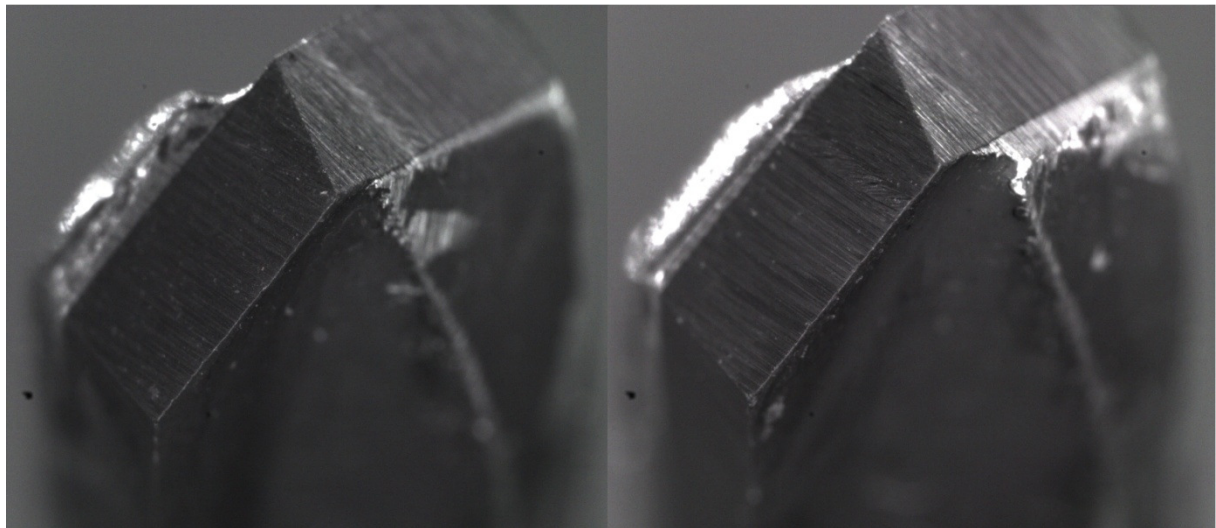
snimiti stanje svrdla nakon izbušenog određenog broja provrta. Identičan postupak ispitivanja primijenio se i za drugo svrdlo.

Kod procesa ispitivanja sila i struja provodilo se sedam mjerenja. Kako je unaprijed bilo određeno 9 različitih parametara obrade, jedno mjerenje se sastojalo od bušenja devet rupa na svakom od tri uzroka kamena. Tako broj izbušenih provrta za jedno mjerenje iznosi 27. Nakon sedam provedenih mjerenja izbušeno je 189 provrta. Nakon procesa ispitivanja uslijedio je proces trošenja. U procesu trošenja izbušeno je 1000 rupa. Nakon procesa trošenja uslijedio je proces ispitivanja istrošenog svrdla. Kao i kod ispitivanja novog svrdla i tu je provedeno sedam mjerenja, odnosno 189 izbušenih provrta. Ukupni broj izbušenih provrta za jedan alat tako iznosi 1378.

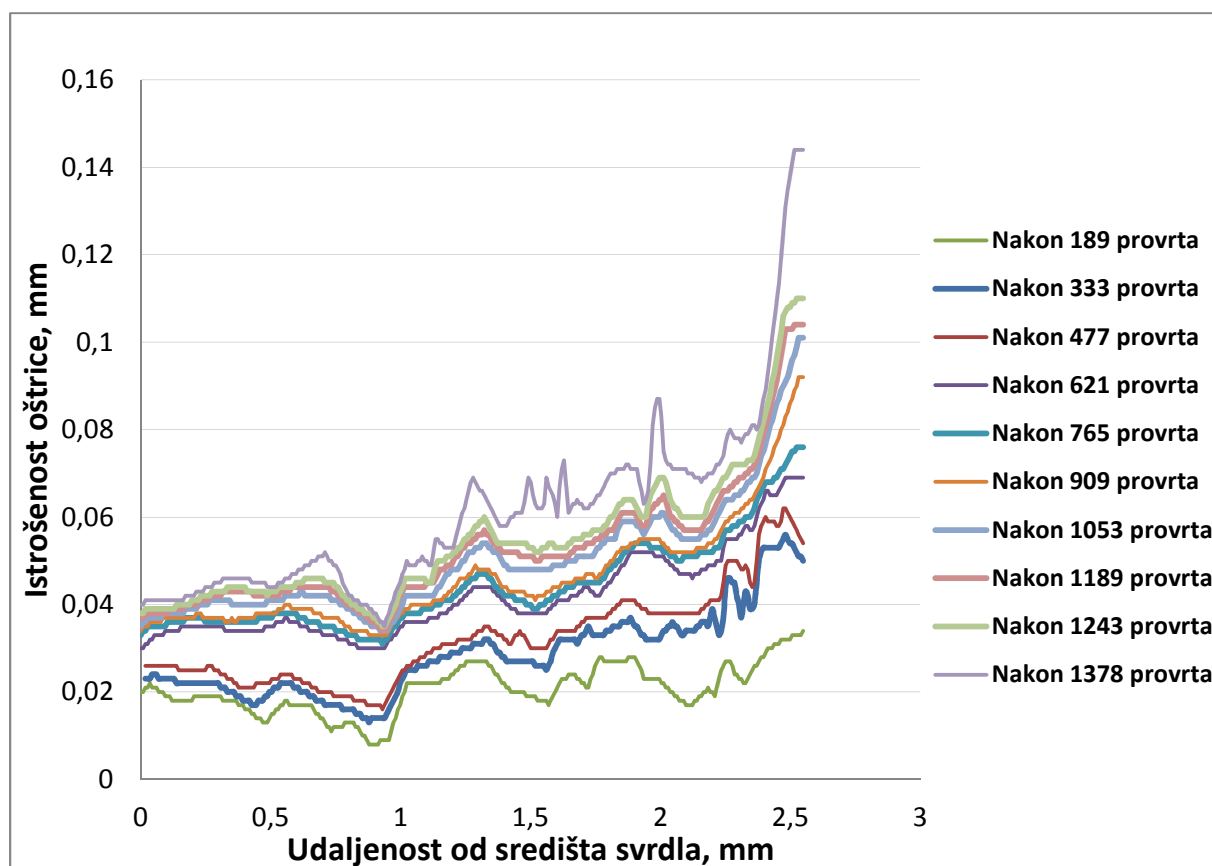
Iz snimljenih slika oštrica, mjerenjem u CAD programu CATIA-i, dobivene su vrijednosti trošenja pojedinih reznih oštrica alata za određeni broj provrta i određenu udaljenost od centra alata odnosno poprečne oštrice.

## 7.6. Trošenje svrdla "A1"

Zbog specifične geometrije svrdla duž oštrice svrdla razvijaju se različite brzine rezanja ovisno o udaljenosti od vrha svrdla odnosno poprečne oštrice. Na mjestu poprečne oštrice dolazi do gnječenja materijala pošto se ne ostvaruje proces rezanja odnosno stvaranje odvojene čestice. Pomakom od sredine svrdla brzina se povećava pa je tako na obodu svrdla maksimalna brzina rezanja te se tu stvara i najviše odvojene čestice, a samim time i dolazi da najvećeg iznosa trošenja alata. Na slici 52 može se vidjeti iznos trošenja oštrice "1", svrdla "A1". Kao što se može vidjeti iz dijagrama najmanji iznos trošenja nalazi se upravo na samom centru svrdla, odnosno kod poprečne oštrice. Kako se udaljavamo od poprečne oštrice prema obodu svrdla istrošenost raste zbog povećanja brzine rezanja, a samim time i intenzivnijeg abrazivnog trošenja alata. Slika 51 prikazuje stanje jedne i druge rezne oštrice i stražnje površine svrdla "A1" prije početka bušenja.



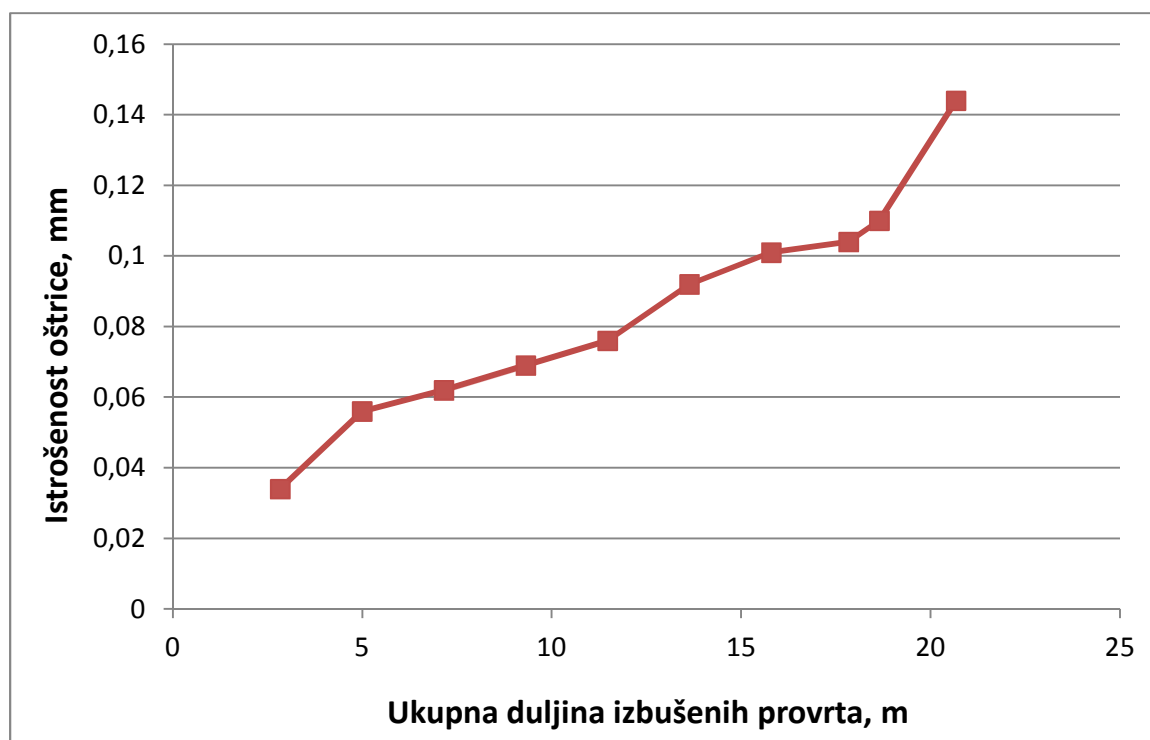
Slika 51. Oštrica "1" (lijevo) i oštrica "2" (desno) alata "A1" prije početka bušenja



Slika 52. Trošenje uzduž oštrice "1", svrdla "A1"

Na slici 52 također je prikazan utjecaj broja izbušenih provrta na trošenje alata. Može se vidjeti kako linija koja prikazuje trošenje nakon 189 izbušenih provrta ima najmanji prirast trošenja odmičući se od središta prema obodu svrdla. Može se primijetiti kako je istrošenosti alata označenog s krivuljom nakon 189 provrta iznosila oko 0,03 mm na najvećoj udaljenosti od vrha alata. Tu se može primijetiti kako je na početku obrade došlo do intenzivnijeg trošenja zbog uhodavanja alata jer se na 765 izbušenih provrta istrošenost povećala na 0,065 mm odnosno povećala se za 0,03 mm nakon 576 provrta. S povećanjem broja provrta istrošenost oštrice postaje sve izražajnije. Približavajući se broju od 1378 izbušenih provrta može se vidjeti kako se trošenje znatno povećalo. Iz pojedinih krivulja trošenja na slici 52 može se primijetiti kako je moguće nelinearno trošenje uzduž oštrice, a uzrok takvom ponašanju je nehomogenost obrađivanog materijala odnosno kamena, odnosno pojavljivanje čestica različitih tvrdoća koje mogu različito utjecati na trošenje oštrice.

Trošenje alata, a pogotovo svrdla, najbolje se može izraziti kao potrošenost alata u odnosu na duljinu puta u posmičnom smjeru. Takav primjer trošenja može se vidjeti na slici 53. Vrijednost izbušene duljine puta dobivena je množenjem broja provrta s dubinom provrta.

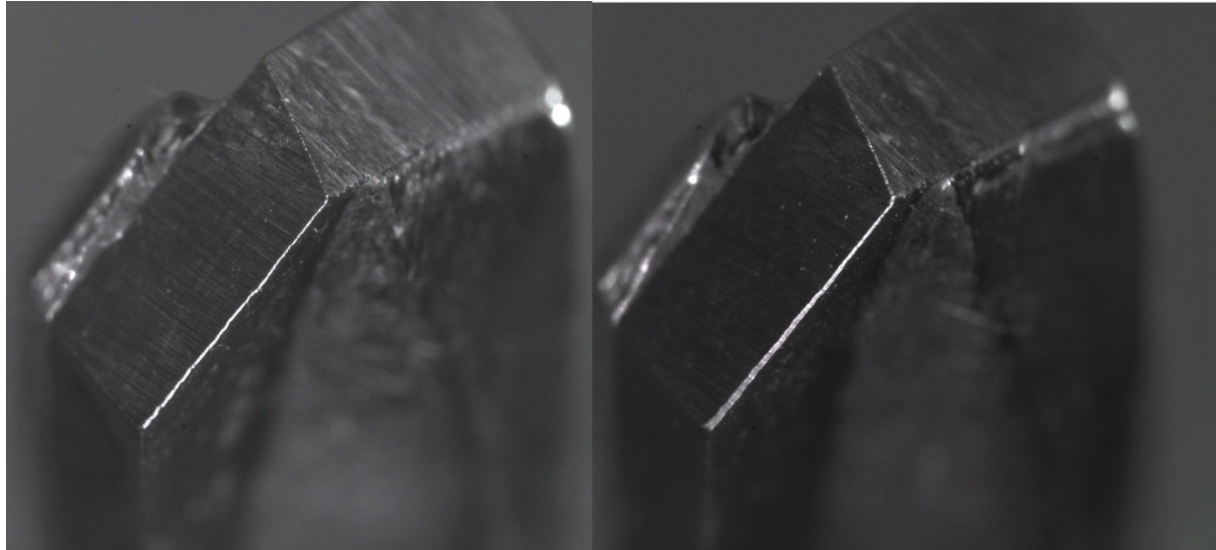


Slika 53. Trošenje oštrice "1" svrdla "A1" u odnosu na dulju puta u posmičnom smjeru

Na slici 53 mogu se vidjeti različiti stadiji trošenja alata opisani u teorijskom dijelu ovoga rada. Na početku se može vidjeti ubrzano trošenje alata zbog uhodavanja alata. Nakon toga dolazi do područja normalnog trošenja u kojem je usporeni prirast trošenja. Prema kraju krivulje može se primijetiti kako iznos trošenja raste većim intenzitetom nego u srednjem dijelu što nam govori da alat ulazi u treći stadij trošenja, odnosno krajnje ubrzano trošenje koje, daljnjom obradom, može dovesti do loma alata.

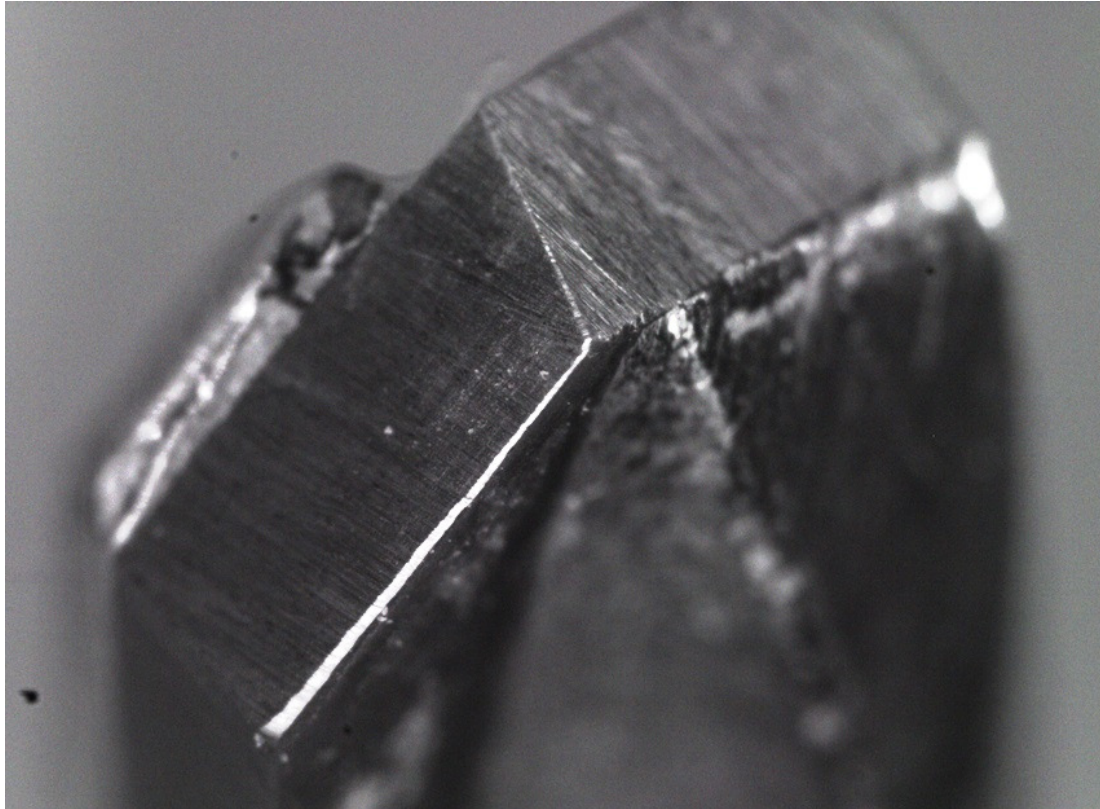
Nakon 189 izbušenih provrta, sa stupnjem istrošenosti alata definiranim oznakom "S1", odnosno 7 provedenih mjerenja, uslijedio je proces trošenja do određenog stupnja istrošenosti. Proces trošenja alata i stanje reznog alata u tom periodu definirano je oznakom "S1→S2". Snimanjem svrdla tijekom procesa trošenja vrijednosti istrošenosti oštrice u ovisnosti o broju provrta, a isto tako i u ovisnosti o izbušenoj duljini, zbog unaprijed određene dubine bušenja. Na slici 54 može se vidjeti istrošenost oštrice nakon izbušenih 1000 rupa u procesu trošenja, odnosno sveukupno 1189 rupa. Ova vrijednost je uzeta za kraj procesa trošenja jer je vrijednost istrošenosti počela rasti sve intenzivnije, što je bio znak da se približavamo trećem stadiju trošenja.





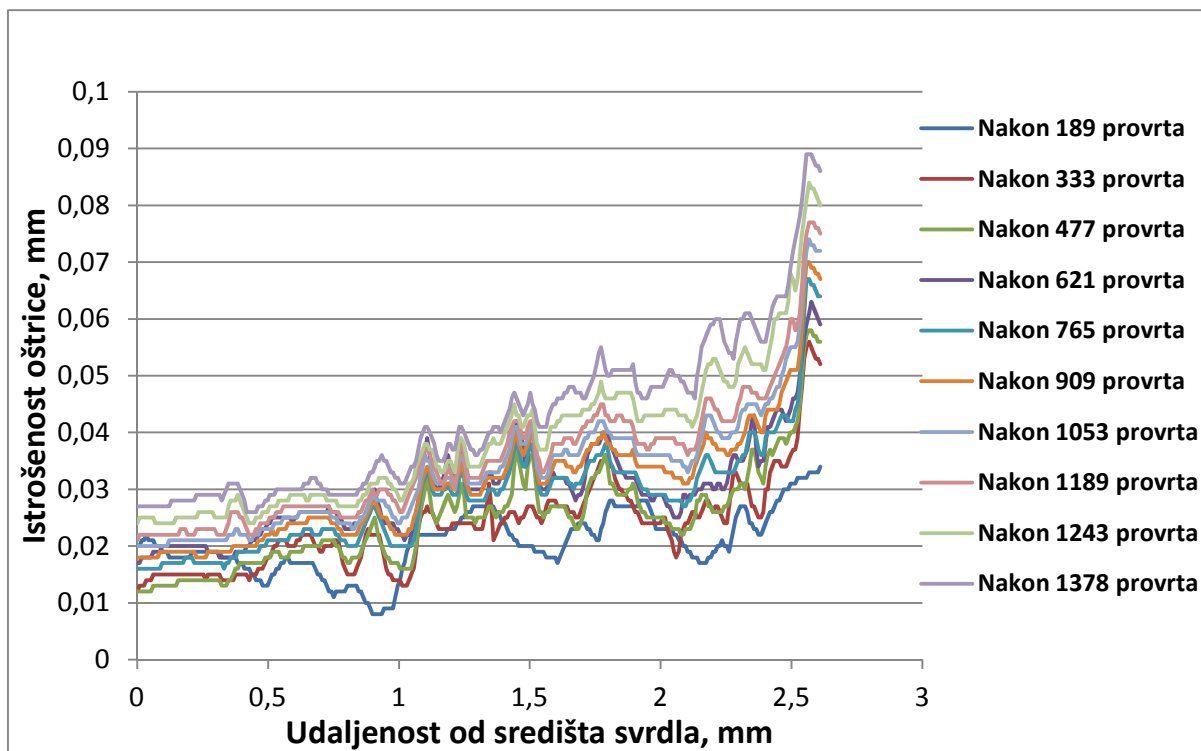
**Slika 54. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "1" svrdla "A1" nakon 189 (lijevo) i nakon 1189 (desno) izbušenih provrta**

Nakon obavljenog procesa trošenja od 1000 izbušenih provrta, ponovno se provelo 7 mjerenja sile i struja glavnog i posmičnog motora kako bi se mogla dobiti ovisnost promjene posmične sile i struje glavnog motora u odnosu na istrošenost alata. Stupanj istrošenosti alata koji je nastupio nakon procesa trošenja nazvan je "S2", a konačno stanje oštrice i stražnje površine alata nakon provedenih mjerenja vidljivo je na slici 55.

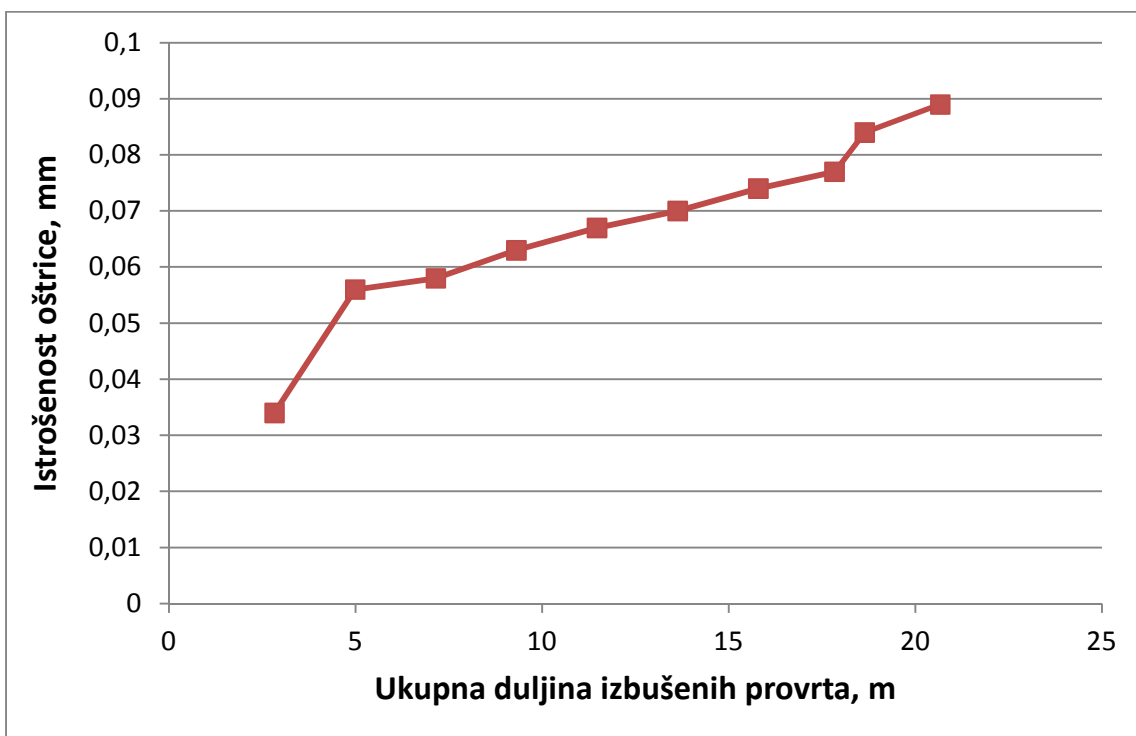


**Slika 55. Istrošenost rezne oštrice i stražnje površine "1" svrdla "A1" nakon 1378 izbušenih provrta**

Na sljedećim slikama može se vidjeti iznos trošenje oštrice "2" istog alata. Kako su obje oštrice istovremeno u zahvatu, dolazi do približno istog iznosa trošenja ukoliko je geometrija jedne i druge oštrice ista.

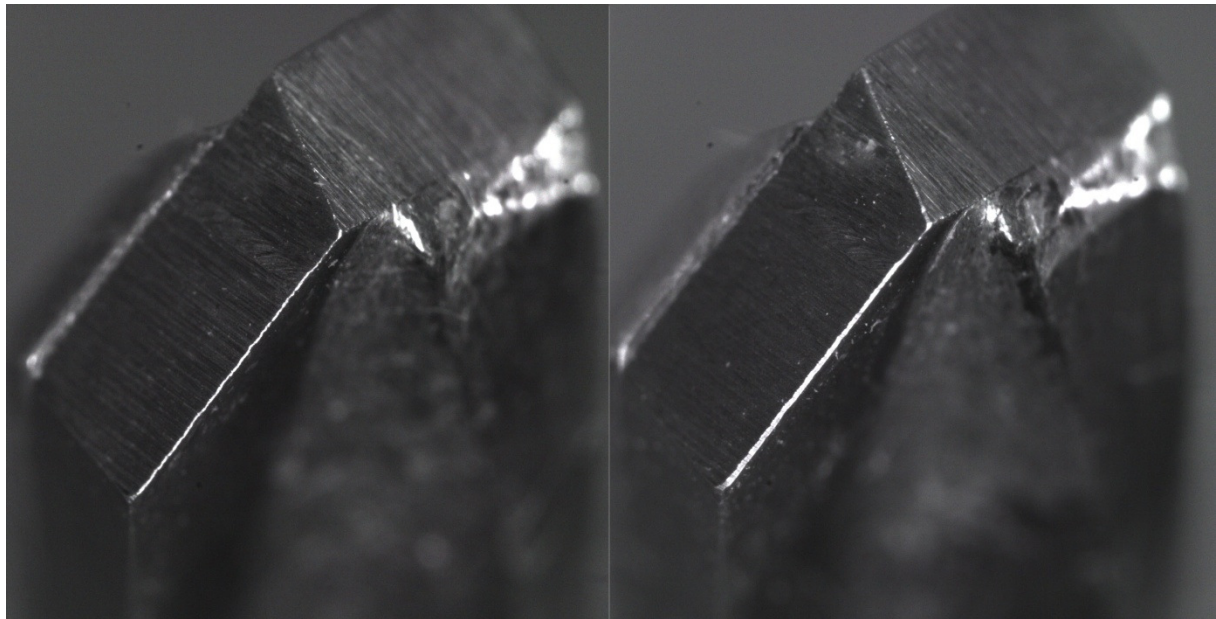


Slika 56. Trošenje uzduž oštrice "2", svrdla "A1"



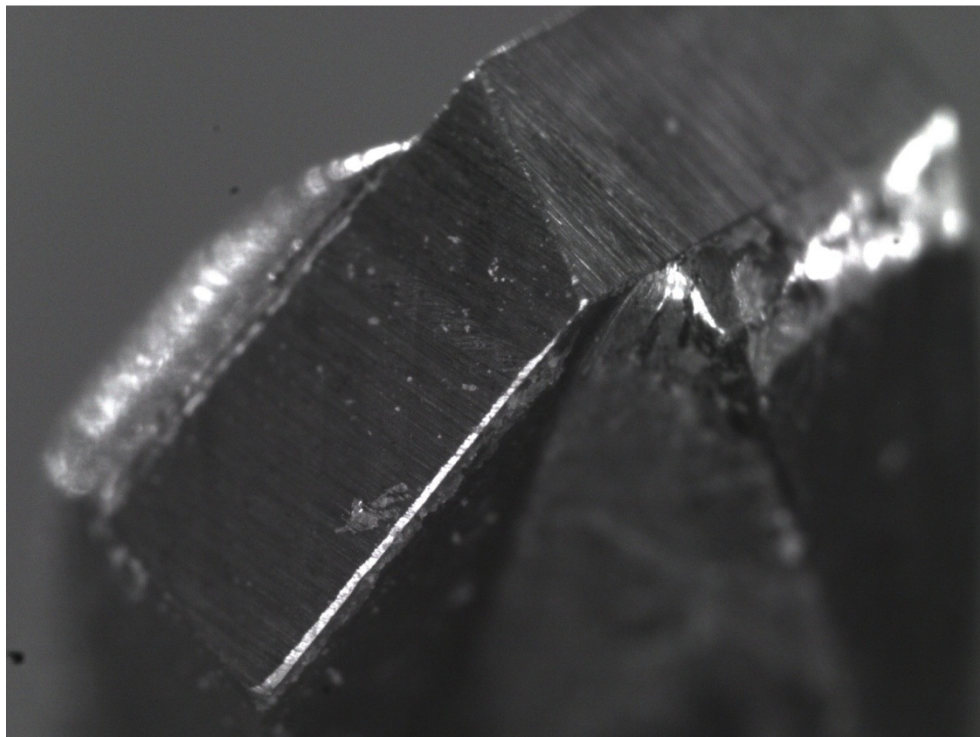
Slika 57. Trošenje oštrice "2" svrdla "A1" u odnosu na duljinu puta u posmičnom smjeru

Usporedba rezne oštrice "2" prije početka procesa trošenja, odnosno stupnja istrošenosti "S1" te nakon završetka procesa trošenja označenog sa "S1→S2", može se vidjeti na slici 58.



**Slika 58. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "2" svrdla "A1" nakon 189 (lijevo) i nakon 1189 (desno) izbušenih provrta**

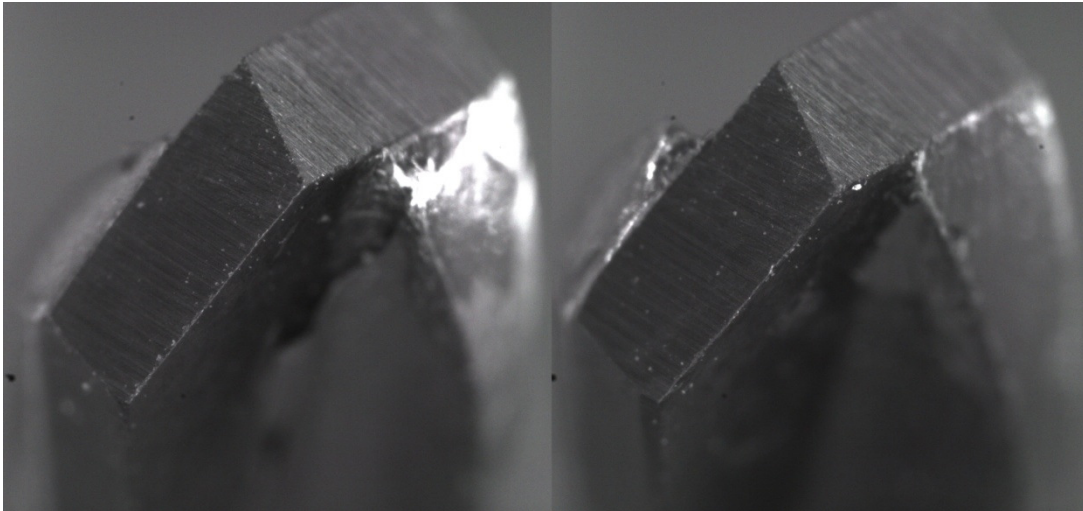
Na slici 59 može se vidjeti istrošenost rezne oštrice "2" nakon obavljenih mjerenja posmičnih sila i struja glavnog motora sa stupnjem istrošenosti "S2" kojim je označeno stanje alata nakon provedenog procesa trošenja.



**Slika 59. Istrošenost rezne oštrice i stražnje površine "2" svrdla "A1" nakon 1378 izbušenih provrta**

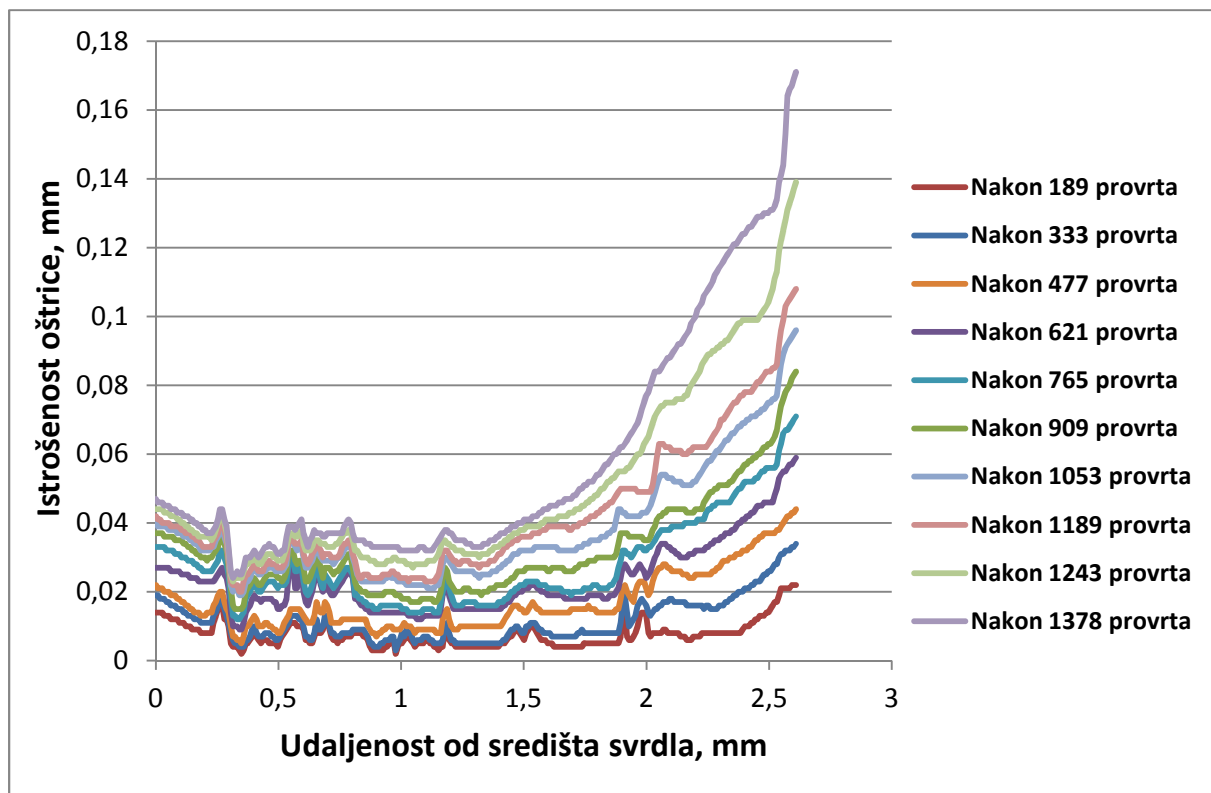
## 7.7. Trošenja svrdla "A2"

Isti postupak mjerenje i ispitivanja kao i za svrdlo "A1", provodio se za ispitivanje svrdla "A2". Rezni dio alata od tvrdog metala kod svrdla "A2" razlikuje se u odnosu na svrdlo "A1" u strukturi tvrdog metala rezne pločice. Zbog različite strukture tvrdog metala, trošenje svrdla "A2" se razlikuje u odnosu na trošenje svrdla "A1". Na slici 60 može se vidjeti izgled reznih oštrica "1" i "2" svrdla "A2" prije početka bušenja.



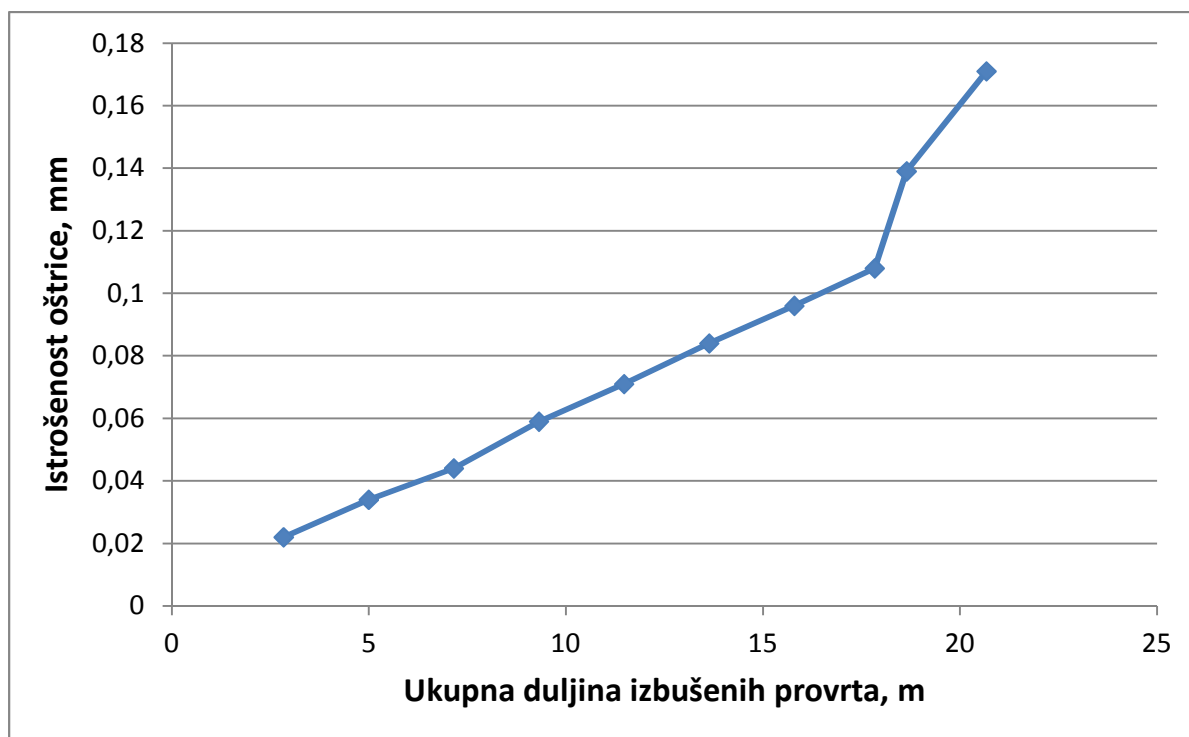
Slika 60. Oštrica "1"(lijevo) i oštrica "2" (desno) alata "A2" prije početka bušenja

Na slici 61 može se vidjeti progresija trošenja rezne oštrice "1" od centra alata, odnosno poprečne oštrice, prema obodu alata. Može se primijetiti kako s odmicanjem od centra svrdla trošenje rezne oštrice i stražnje površine raste kao posljedica povećanja brzine rezanja. Također se može primijetiti razlika u istrošenosti oštrice s povećanjem broja provrta. Kod većeg broja provrta dolazi do veće razlike u istrošenosti oštrice blizu centra i na obodu što ukazuje na smanjivanje otpornosti alata na abrazijsko trošenje, koje je dominantno kod obrade kamena, i samim time povećanje intenziteta trošenja.



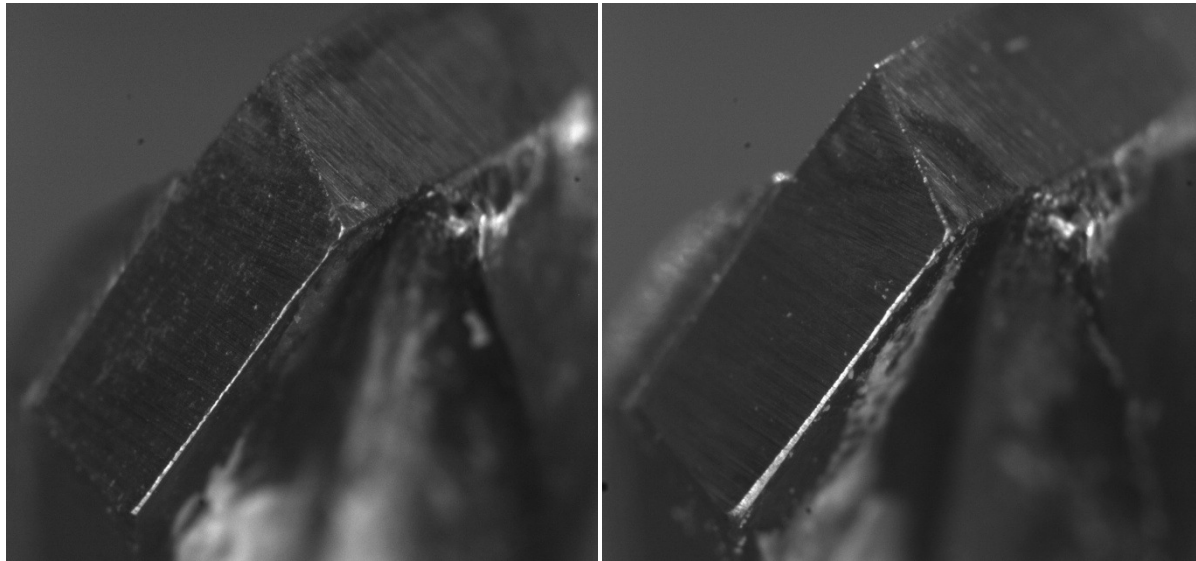
Slika 61. Trošenje uzduž oštrice "1", svrdla "A2"

Trošenje oštrice "1" alata "A2" u odnosu na duljinu puta u posmičnom smjeru može se vidjeti na slici 62.



Slika 62. Trošenje oštrice "1" svrdla "A2" u odnosu na duljinu puta u posmičnom smjeru

Na slici 63. može se vidjeti istrošenost oštrice alata na početku i na kraju procesa trošenja.



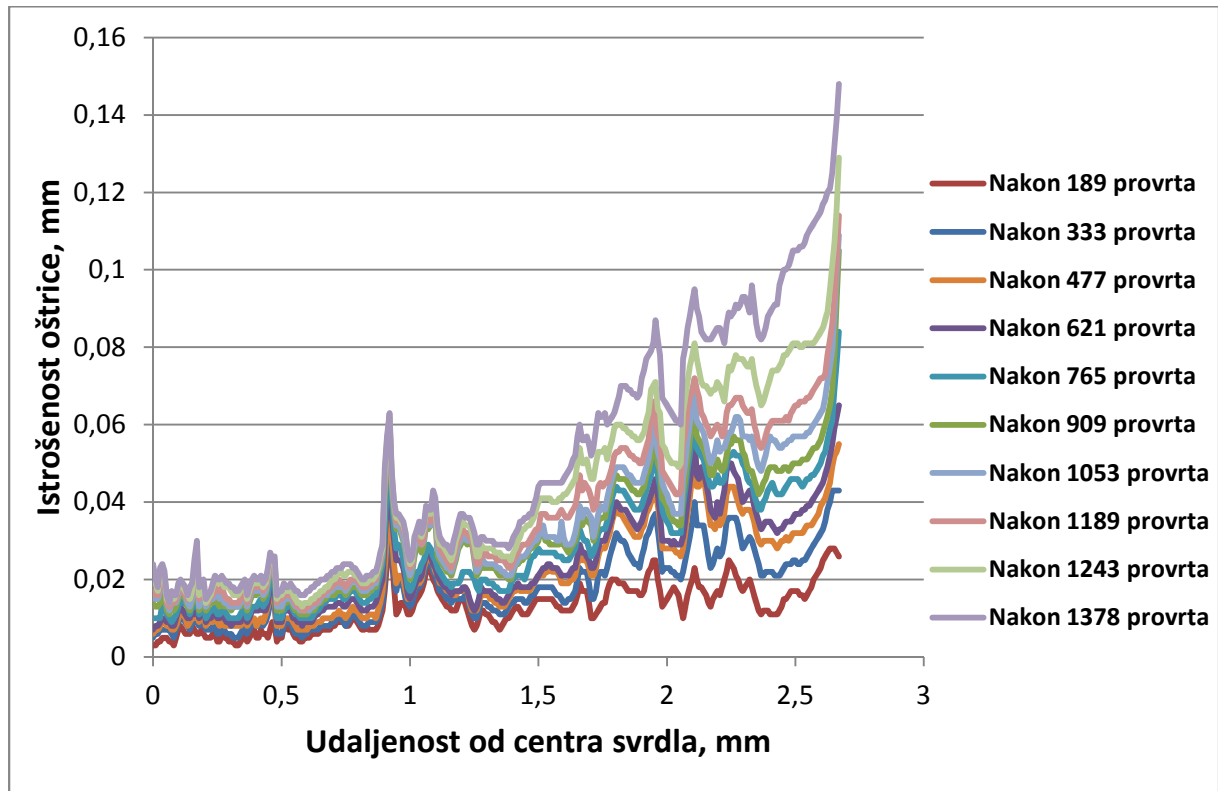
**Slika 63. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "1" svrdla "A2" nakon 189 (lijevo) i nakon 1189 (desno) izbušenih provrta**

Nakon ciklusa trošenja, provodila su se mjerenje sila i struja motora sa stupnjem istrošenosti "S2" jednako kao i kod svrdla "A1", a izgled oštrice nakon provedenog mjerenja može se vidjeti na slici 64.



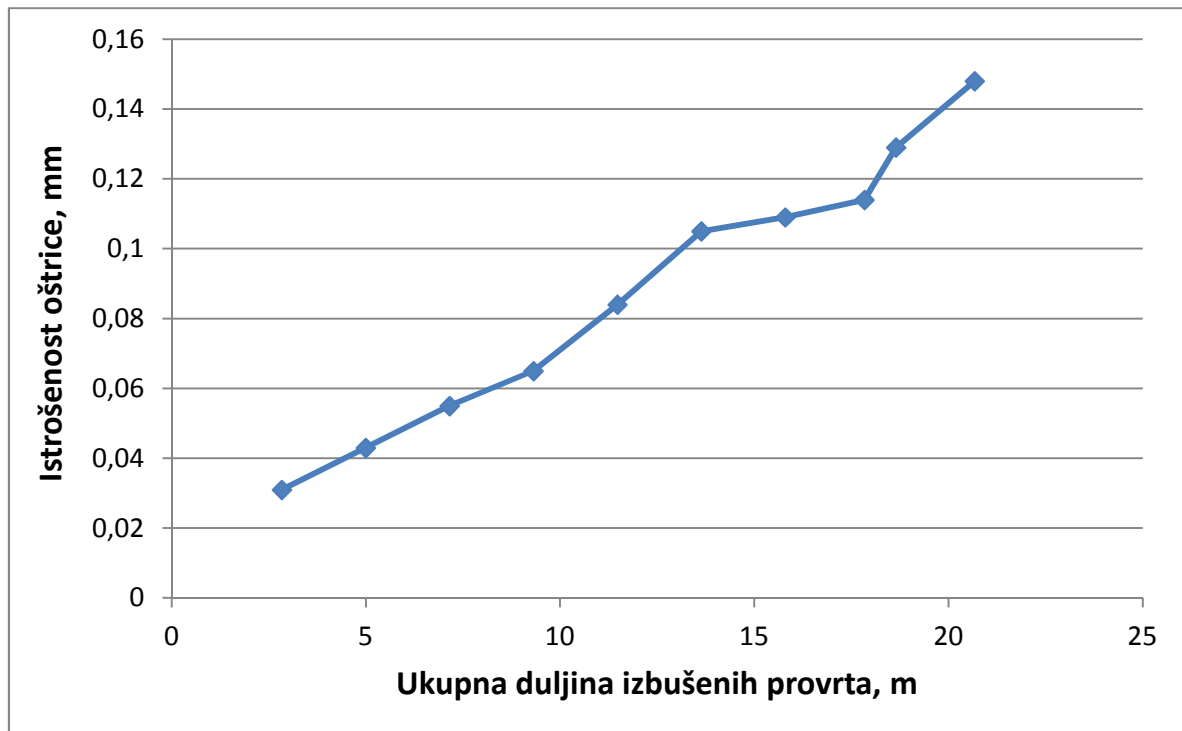
**Slika 64. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "1" svrdla "A2" nakon 1378 izbušenih provrta**

Kao i za oštricu "1" na slijedećim slikama se može vidjeti trošenje stražnje površine i rezne oštrice "2". Zbog nejednolike tvrdoće obrađivanog materijala odnosno kamena, može se primijetiti pojava brazdi koje su rezultat pojave vrlo tvrdih čestica unutar strukture kamena.

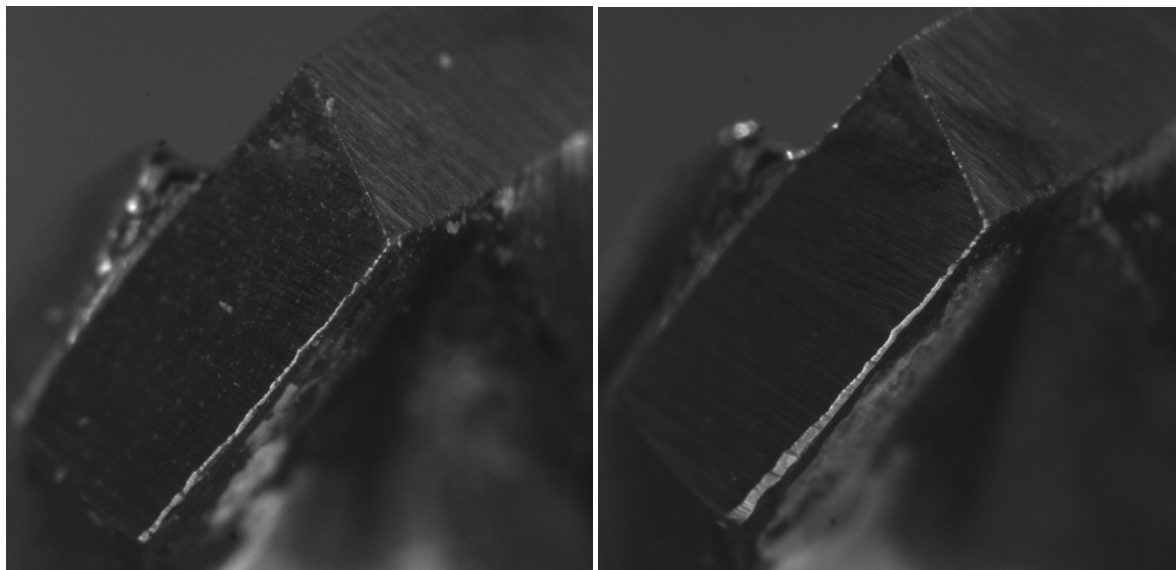


Slika 65. Trošenje uzduž oštrice "2", svrdla "A2"





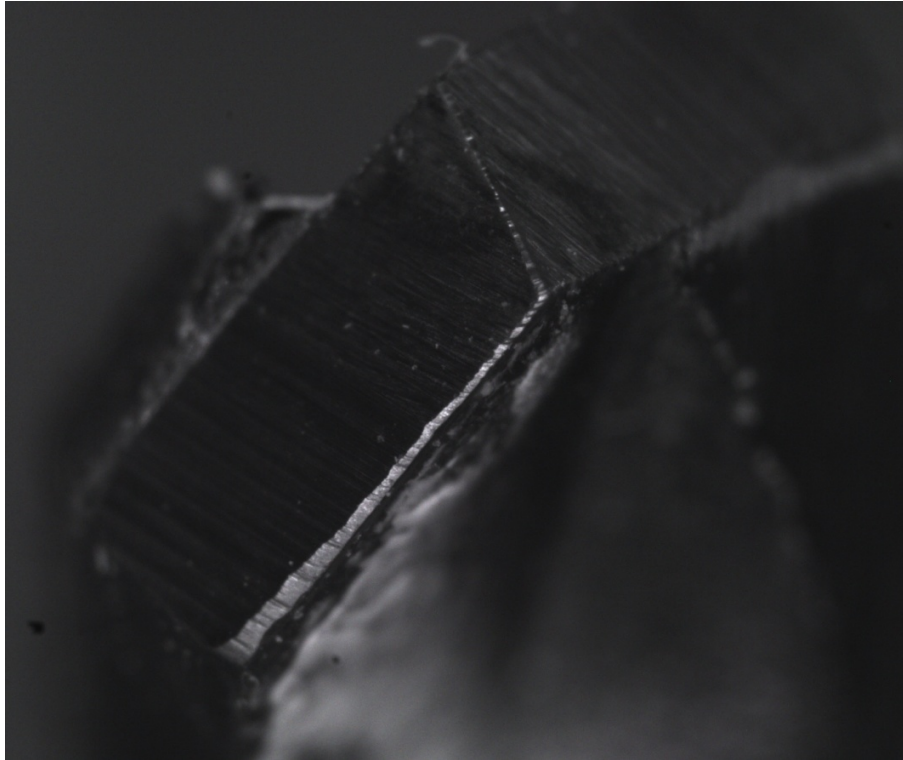
Slika 66. Trošenje oštrice "2" svrdla "A2" u odnosu na duljinu puta u posmičnom smjeru



Slika 67. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "2" svrdla "A2" nakon 189 (lijevo) i nakon 1189 (desno) izbušenih provrta

Na slici 67 može se vidjeti istrošenost svrdla prije početka i nakon završetka ciklusa trošenja. Također je moguće primijetiti pojavu brazdanja, kao i povećan iznos trošenja na obodu svrdla.

Slika 68 nam prikazuje stanje stražnje površine i rezne oštrice "2" nakon obavljenih mjerenja sila i struja sa stupnjem istrošenosti alata "S2".



Slika 68. Izgled rezne oštrice i stražnje površine "2" svrdla "A2" nakon 1378 izbušenih provrta

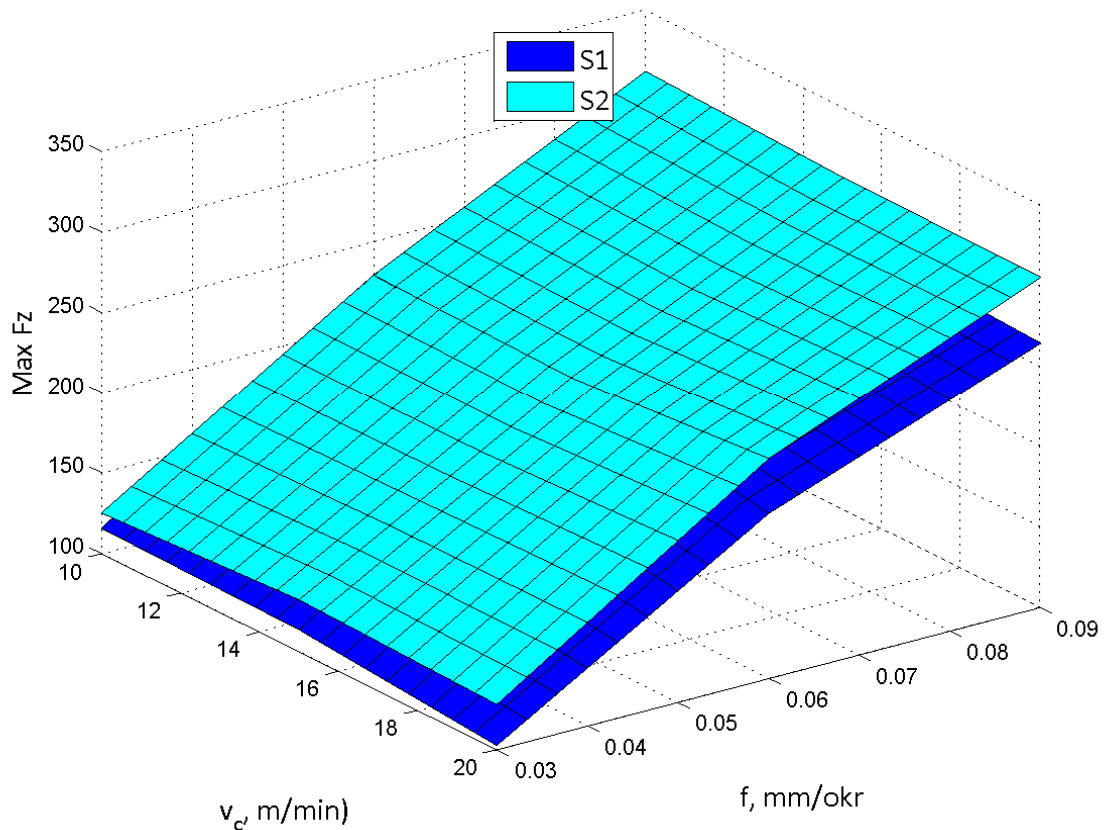
## 7.8. Sile rezanja i struje motora

Svrha eksperimentalnog dijela ovog rada bila je prikazati, osim utjecaja materijala alata i duljine bušenja na trošenje, i utjecaj parametara obrade na sile koje se pojavljuju na alat tijekom obrade kao i struje glavnog motora i motora u posmičnom smjeru. Kako se u prethodnom dijelu moglo vidjeti trošenje oštrice i stražnje površine alata, za očekivati je da će se sile i struje motora mijenjati sa stupnjem istrošenosti alata. Na taj način bi se mogao procijeniti stupanj istrošenosti alata čak i tijekom procesa obrade kako bi se na vrijeme moglo reagirati i spriječiti prekomjerno trošenje. Sile tijekom procesa mjerile su se senzorom za mjerenje sila instaliranim na napravu za prihvat obradaka, a signali struja su dobiveni iz senzora ugrađenih u motor glavnog vretena i posmični motor.

### 7.8.1. Sile i struje kod obrade sa svrdlom "A1"

Mjerenja sila i struja motora provodila su se za dva stupnja istrošenosti alata. Mjerenja za prvi stupanj, označen sa "S1", provodila su se s novim svrdlom do 189 izbušenih provrta, odnosno provedenih 7 mjerenja s različitim brzinama i posmacima na tri različita kamena. Mjerenja za drugi stupanj, označen sa "S2", su se provodila sa svrdlom nakon završenog procesa trošenja, odnosno nakon izbušenih 1000 provrta u procesu trošenja i izbušenih 189 provrta tijekom prvog mjerenja. Razlike u dobivenim iznosima struja i sila prikazat će se u

odnosu na parametre obrade ali isto tako i u odnosu na stupanj istrošenosti. Slika 69 prikazuje utjecaj brzine rezanja, posmaka i stupnja istrošenosti alata na maksimalnu posmičnu silu, odnosno silu u smjeru osi z.

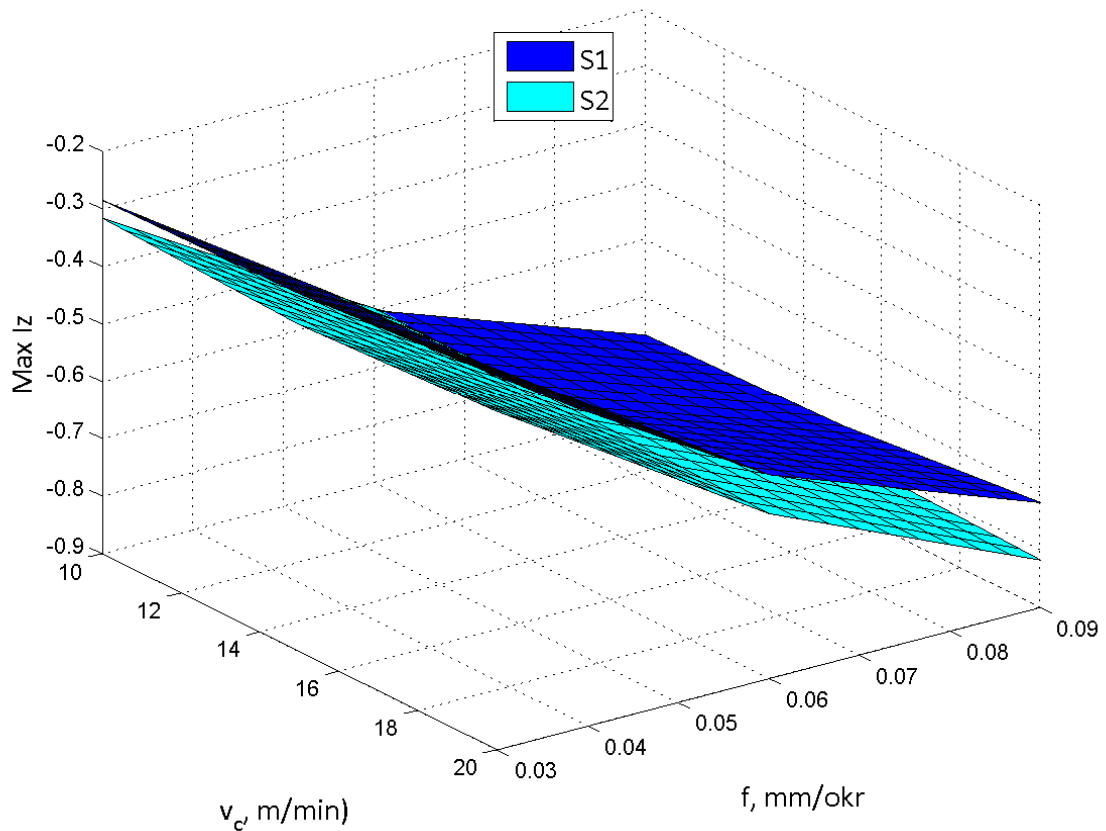


**Slika 69.** Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na posmičnu silu kod svrdla "A1"

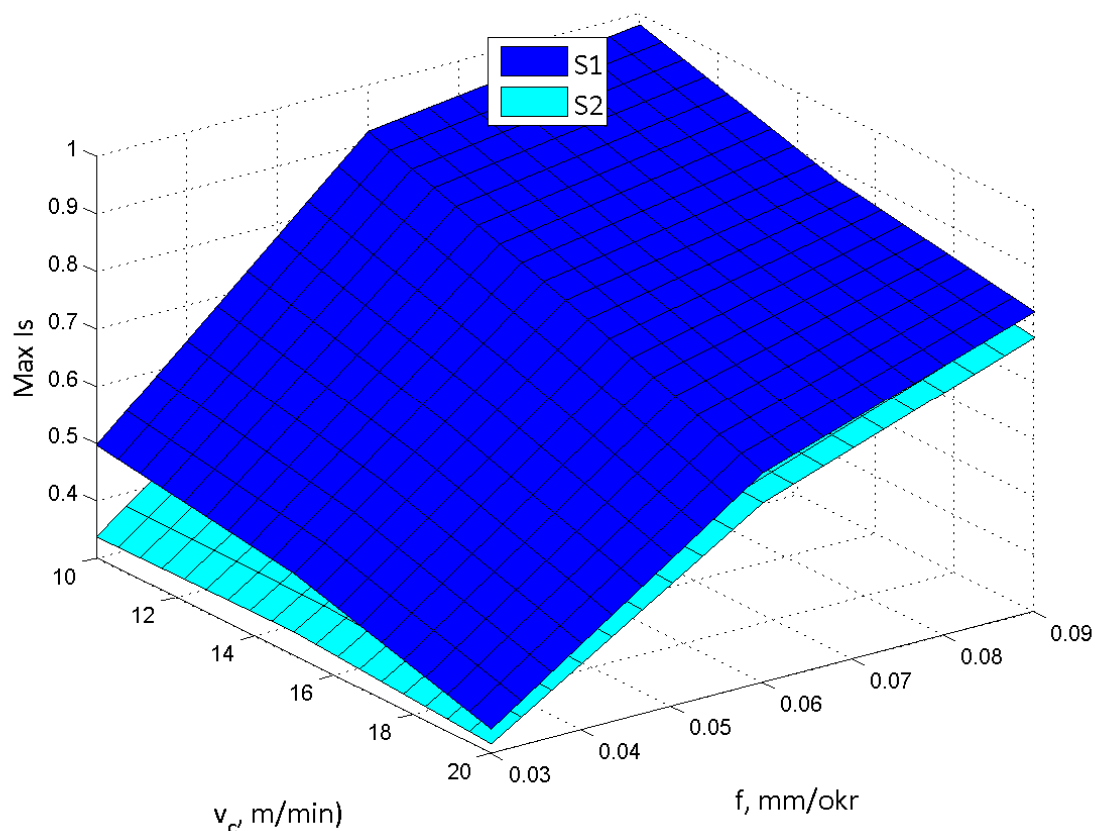
Iz slike 69 može se zaključiti kako najveći utjecaj na povećanje posmične sile,  $F_z$ , ima upravo povećanje posmaka što je i logično jer se s povećanjem posmaka dobiva veći presjek odvojene čestice. Također se može primijetiti kako povećanje brzine rezanja nema veliki utjecaj na povećanje sile u posmičnom smjeru. Iz prikaza površina S1 i S2 može se također zaključiti kako s povećanjem istrošenosti alata dolazi i povećanja sila koje se pojavljuju prilikom rezanja. To se događa zbog istrošenosti stražnje površine i rezne oštrice alata što dovodi do smanjenja mogućnosti stvaranja odvojene čestice.

Na slici 70 može se vidjeti utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti alata na struju posmičnog motora,  $I_z$ , zaduženog za ostvarivanje posmičnog gibanja alata u smjeru osi z. Iz slike je vidljivo kako najveći utjecaj na struju glavnog motora ima upravo povećanje

posmaka. Iz toga se može zaključiti kako je struja posmičnog motora u korelaciji s posmičnom silom odnosno kako bi se mogla svladati veća sila potreban je i veći iznos struje. Također je vidljivo kako s povećanim stupnjem istrošenosti alata raste i maksimalna struja posmičnog motora pa se i na taj način može procijeniti stupanj istrošenosti alata.



Slika 70. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na struju posmičnog motora kod svrdla "A1"



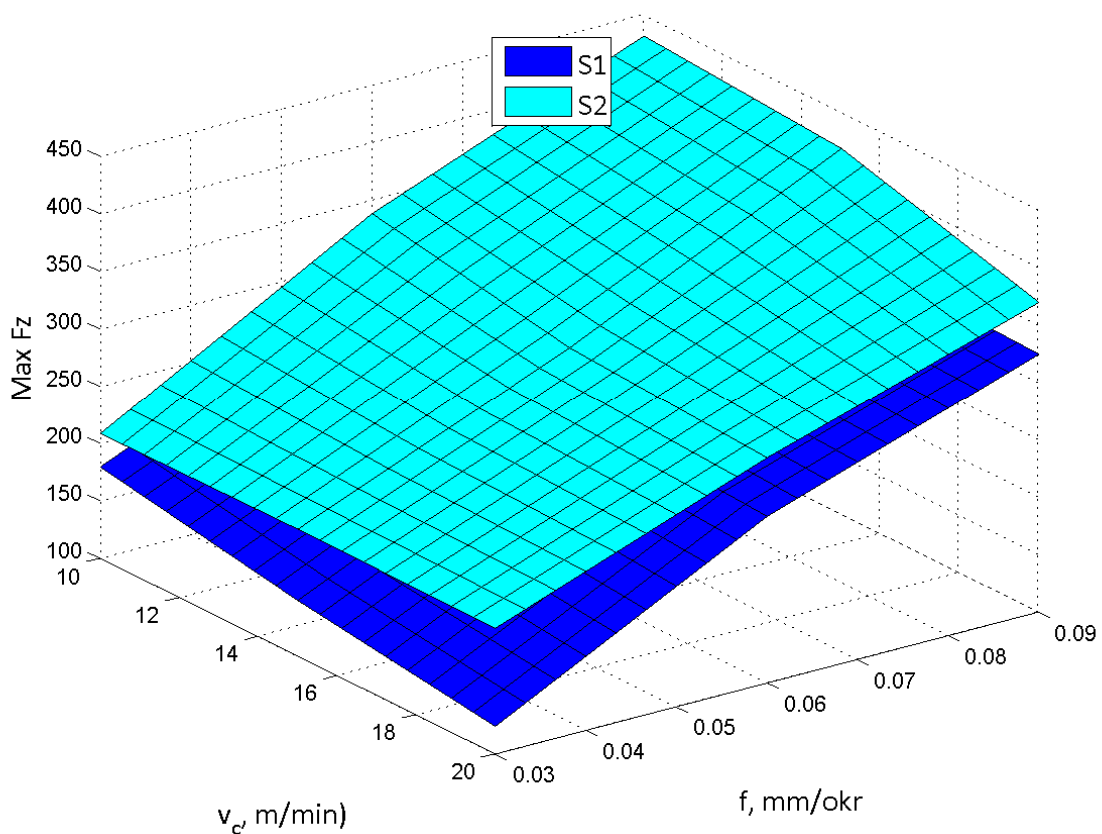
**Slika 71. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na struju motora glavnog vretena kod svrdla "A1"**

Na slici 71 može se vidjeti utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti alata na struju motora glavnog vretena označenu s  $I_S$ . Najveći utjecaj na struju motora glavnog vretena ima povećanje posmaka. Vrijednost struje motora glavnog vretena približno je jednaka za prvi i drugi stupanj istrošenosti alata te se ne može uzeti kao dobar pokazatelj stupnja istrošenosti alata.

### 7.8.2. Sile i struje kod obrade sa svrdlom "A2"

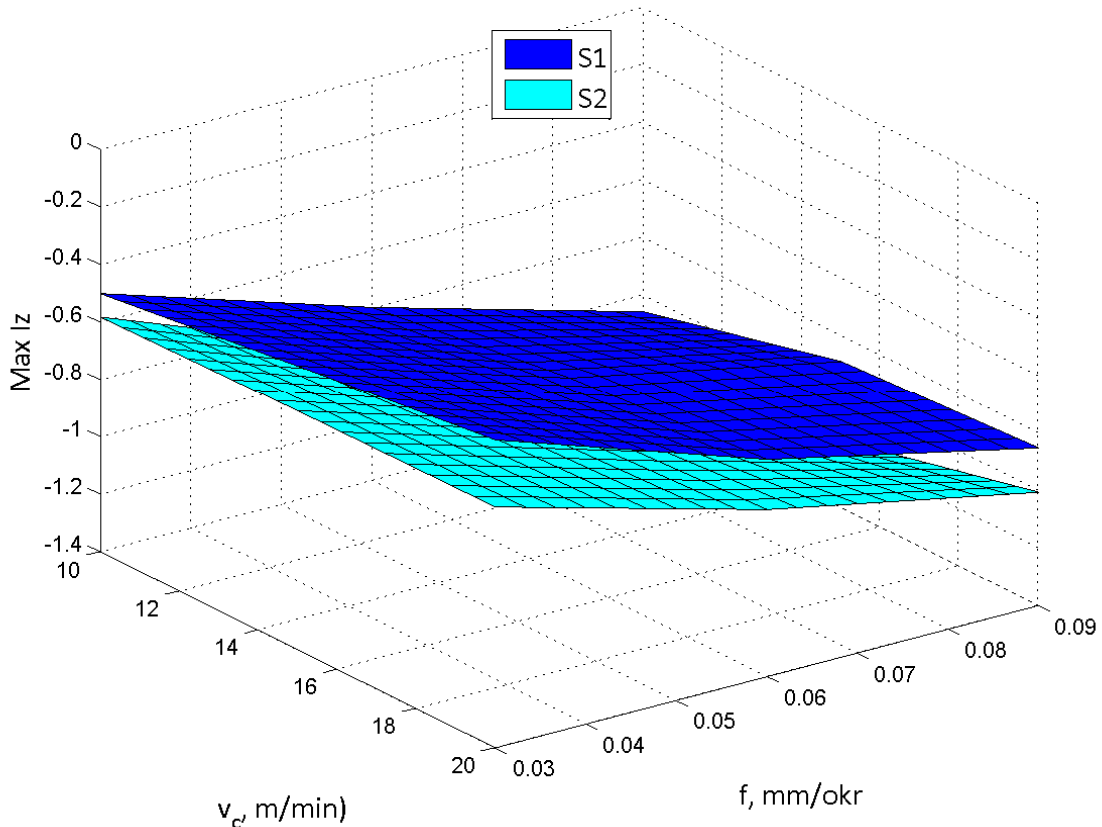
Isto kao i za svrdlo "A1" mjerenja sila i struja motora za svrdlo "A2" provodila su se za dva stupnja istrošenosti alata. Razlika svrdla "A2" u odnosu na svrdlo "A1" je u vrijednosti vršnog kuta, koji za svrdlo "A1" iznosi  $118^\circ$ , a za svrdlo "A2"  $116^\circ$ , ali i u strukturi tvrdog metala.

Slika 72 prikazuje utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na vrijednost sile u posmičnom smjeru. Kao i kod svrdla "A1" i ovdje se može primijetiti kako najveći utjecaj na povećanje sile ima upravo povećanje posmaka. Povećanje brzine rezanja nema značajno utjecaja na povećanje posmične sile, dok veći stupanj istrošenosti daje veće vrijednosti sile u posmičnom smjeru. Stoga vrijednost sile u posmičnom smjeru može biti dobar pokazatelj stupnja istrošenosti svrdla.



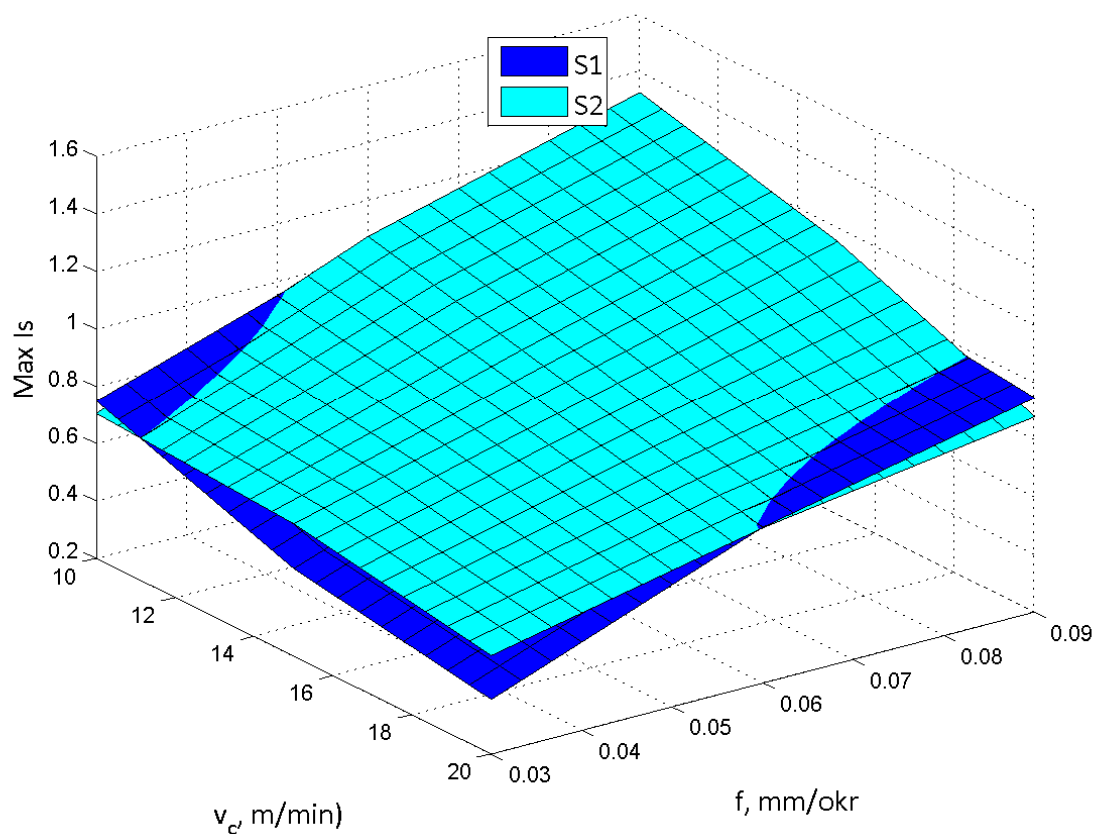
Slika 72. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na posmičnu silu kod svrdla "A2"

Slika 73 prikazuje utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na struju posmičnog motora. Najveći utjecaj na struju motora ima vrijednost posmaka, ali isto tako i stupanj istrošenosti alata. Zbog toga jer je vrijednost struje motora u korelaciji s posmičnom silom, ista je također dobar pokazatelj stupnja istrošenosti alata.



**Slika 73. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na struju posmičnog motora kod svrdla "A2"**

Slika 74 prikazuje utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti alata na struju motora glavnog vretena. Najveći utjecaj na struju motora glavnog vretena ima povećanje posmaka. Vrijednost struje motora glavnog vretena približno je jednaka za oba stupnja istrošenosti alata, pa se ne može uzeti kao dobar pokazatelj stupnja istrošenosti alata.



**Slika 74. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti na struju motora glavnog vretena kod svrdla "A2"**

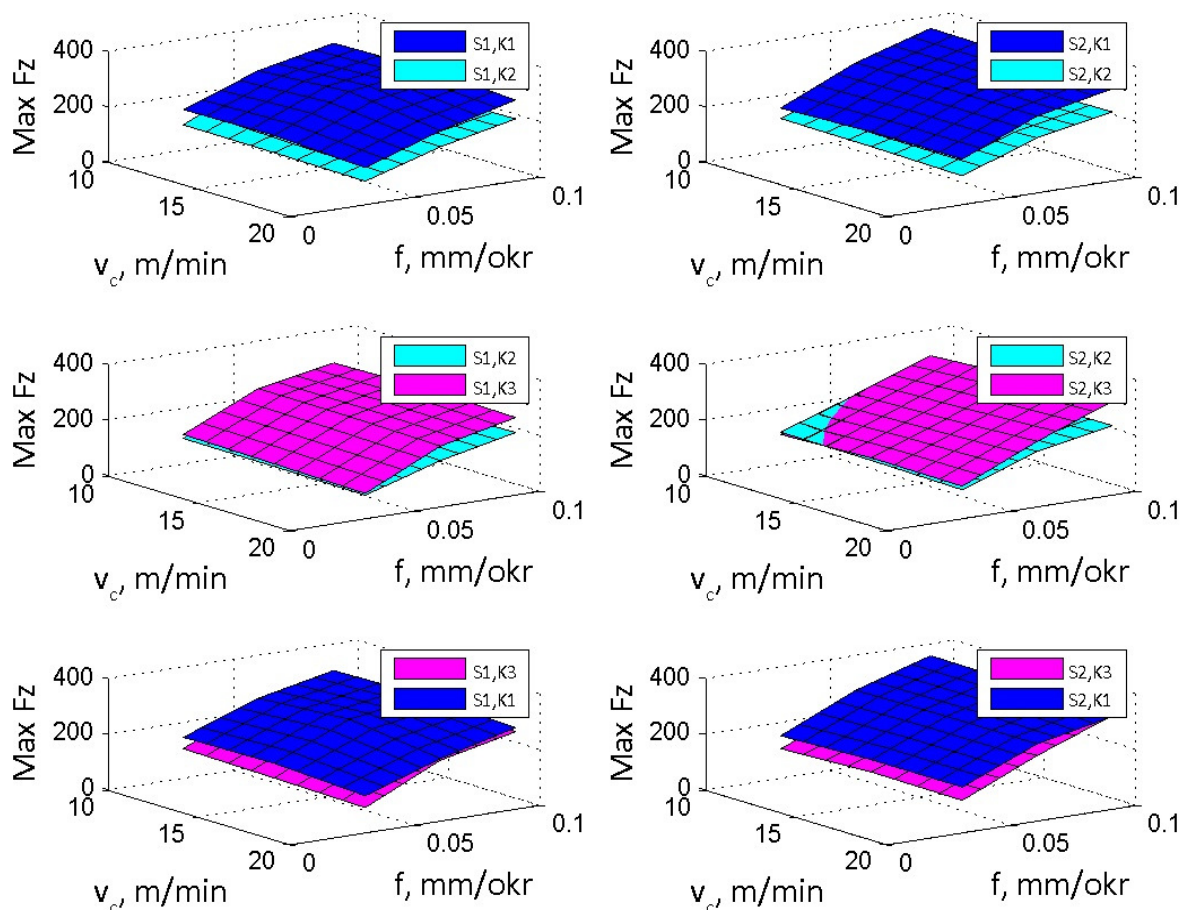
Iz slike 74 se može vidjeti kako se površine S1 i S2 na nekim mjestima poklapaju, što znači da vrijednost struje motora glavnog vretena ne ovisi o stupnju istrošenosti oštrice pa se kao takva ne može uzeti kao dobar pokazatelj istrošenosti oštrice.



## 7.9. Utjecaj strukture kamena na sile i struje posmičnog motora

Proces bušenja izvodio se na tri različita kamena s oznakama "K1", "K2" i "K3". Razlika u kamenima bila je u njihovoj strukturi i udjelima određenih dijelova različitih tvrdoća zbog kojih se i takvi materijali nazivaju nehomogenim materijalima. Isti broj mjerenja provodio se na svakom kamenu, a tijekom procesa bušenja zapisivale su se vrijednosti sila i struja motora kako bi se dobila usporedba utjecaja strukture kamena na sile koje se pojavljuju tijekom procesa bušenja, a isto tako i vrijednosti struja posmičnog motora i motora glavnog vretena.

Na slici 75 može se vidjeti odnos različitih kamena i njihov utjecaj na vrijednost sile u posmičnom smjeru kod obrade sa svrdlom "A1" stupnja istrošenosti "S1" i "S2".

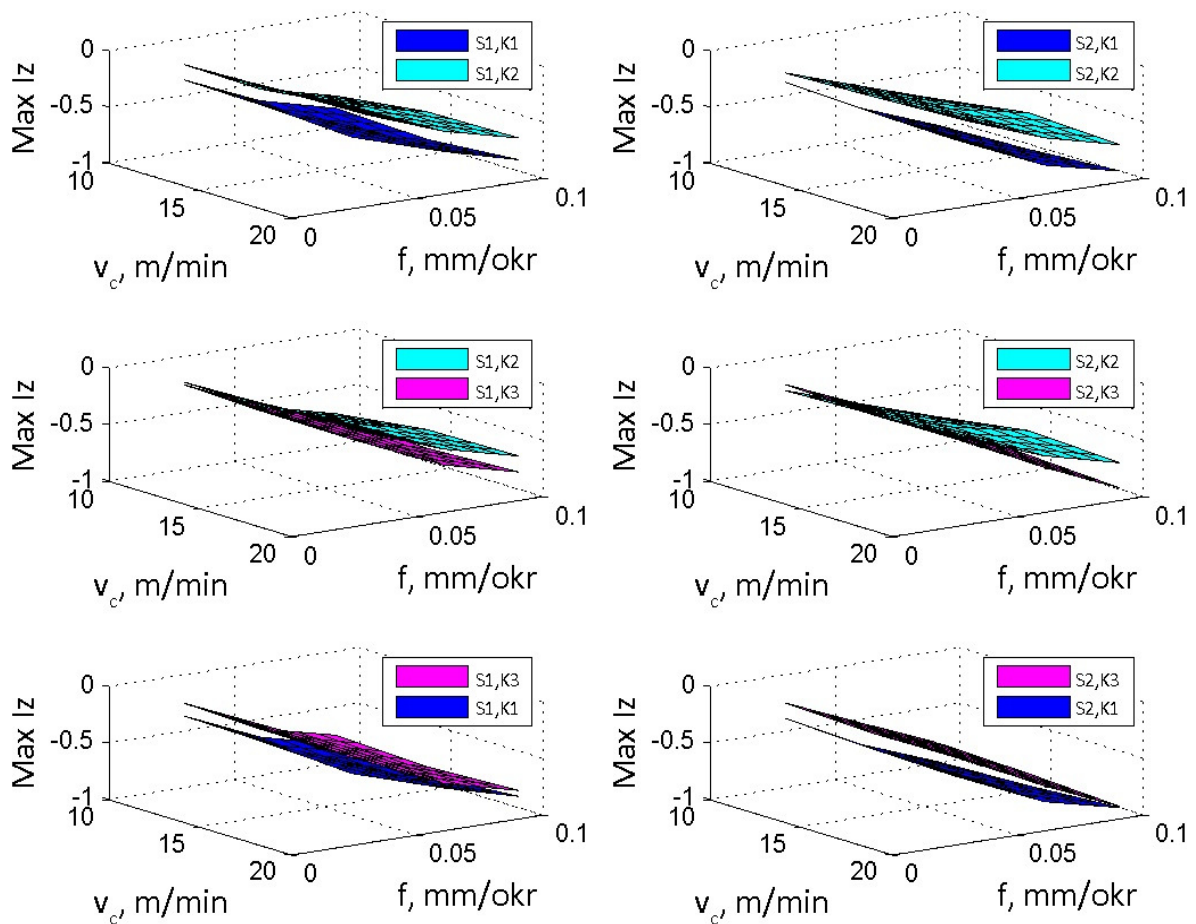


Slika 75. Odnos utjecaja različitih kamena na posmičnu silu za alat "A1"

Na slici 75 se može vidjeti kako različite strukture kamena utječu na silu u posmičnom smjeru. Najveće vrijednosti sile, kod bušenja alatom stupnja istrošenosti "S1", pojavljuju se

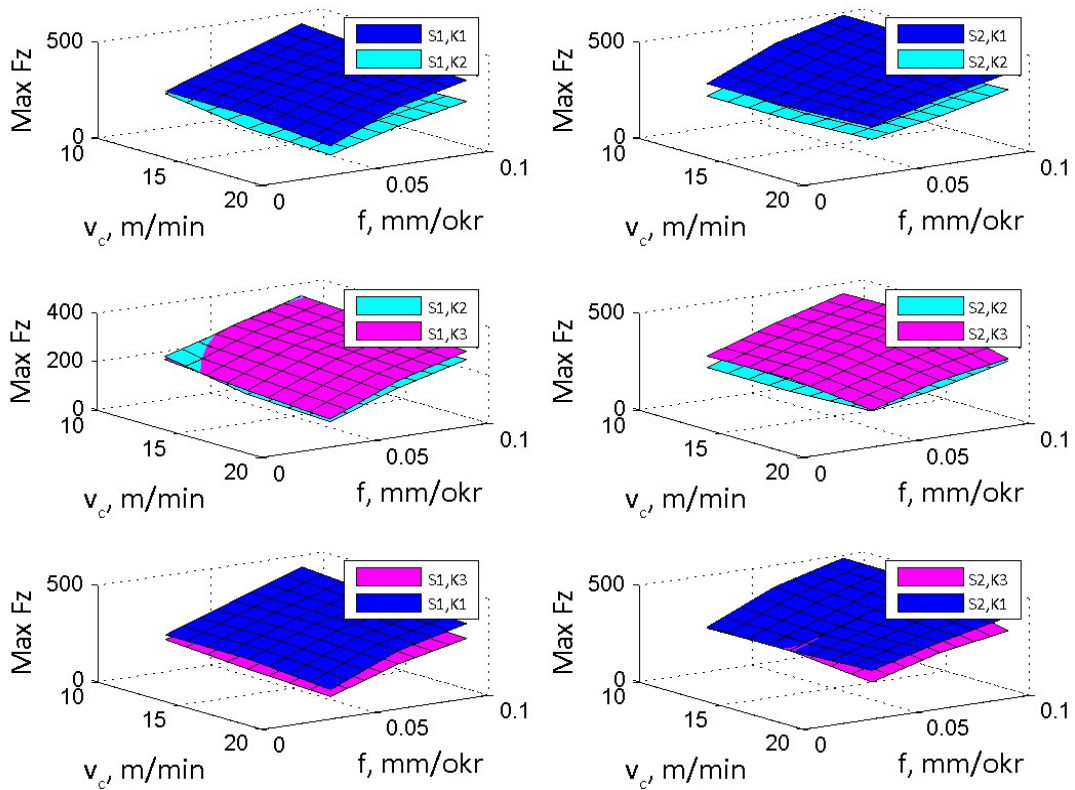
prilikom bušenja kamena "K1", dok su najmanje vrijednosti kod bušenja kamena "K2". Takav uzorak može se primijetiti kod bušenja kamena s alatom stupnja istrošenosti "S2".

Kako su iznosi posmične sile u korelaciji sa strujom posmičnog motora, procjena utjecaja različitih struktura kamena na sile rezanja i trošenje alata može se prikazati i strujom posmičnog motora kao što je prikazano na slici 76.

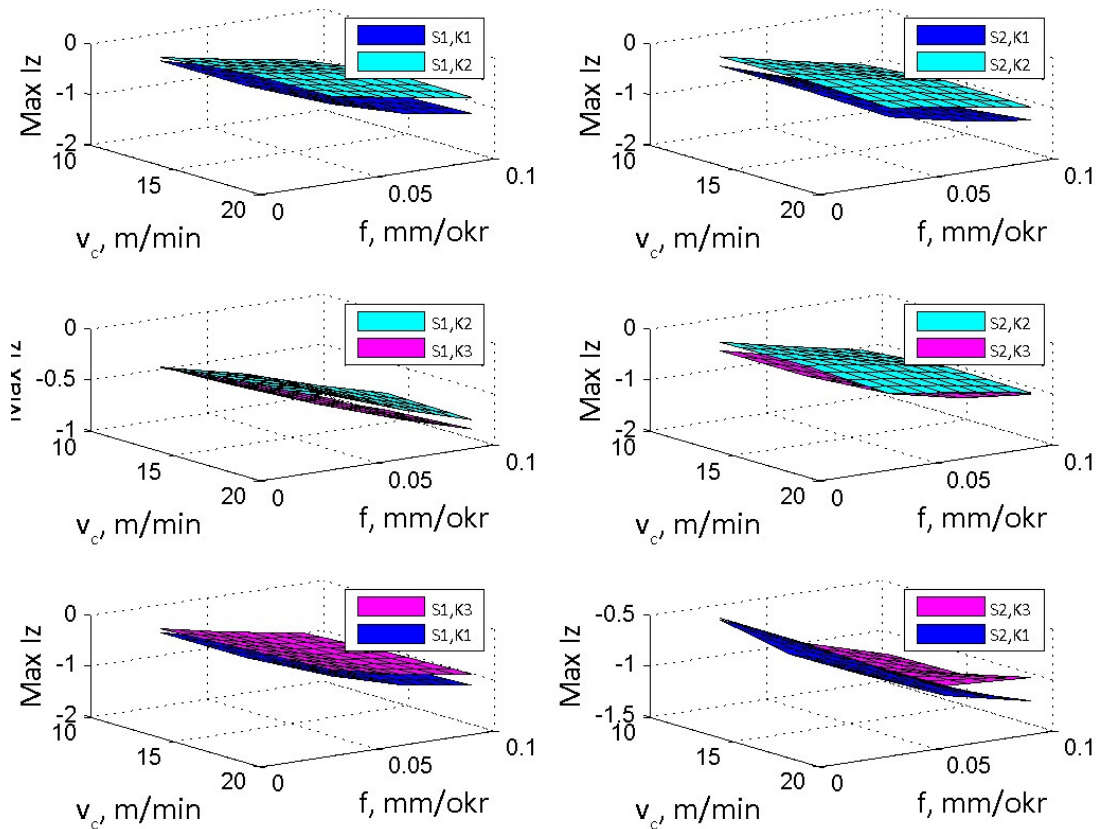


**Slika 76. Odnos utjecaja različitih kamena na struju posmičnog motora za alat "A1"**

Iste vrijednosti odnosa utjecaja različitih struktura kamena na posmičnu silu i struju posmičnog motora mogu se vidjeti i kod bušenja sa svrdlom "A2", uz nešto više iznose sile i struje motora zbog različite geometrije i strukture tvrdog metala od kojeg su izrađene rezne pločice svrdla "A2". Vrijednosti i odnosi sila kod bušenja različitih kamena sa svrdlom "A2" mogu se vidjeti na slici 77, a vrijednosti struja posmičnog motora na slici 78.



Slika 77. Odnos utjecaja različitih kamena na posmičnu silu za alat "A2"

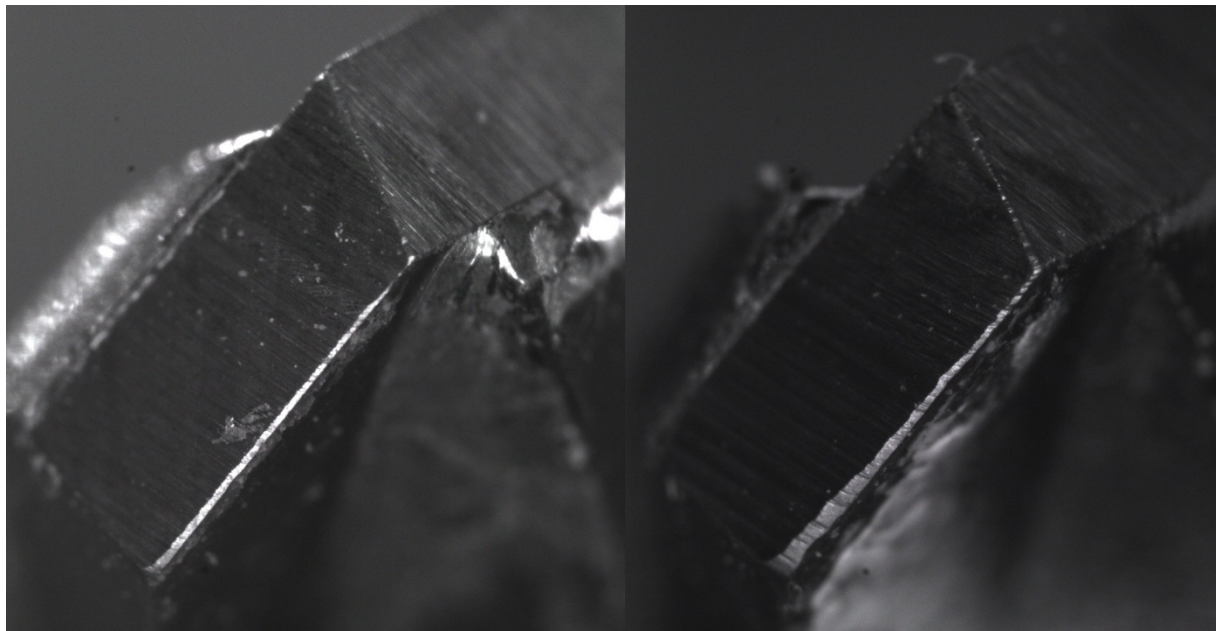


Slika 78. Odnos utjecaja različitih kamena na struju posmičnog motora za alat "A2"

## 7.10. Usporedba rezultata

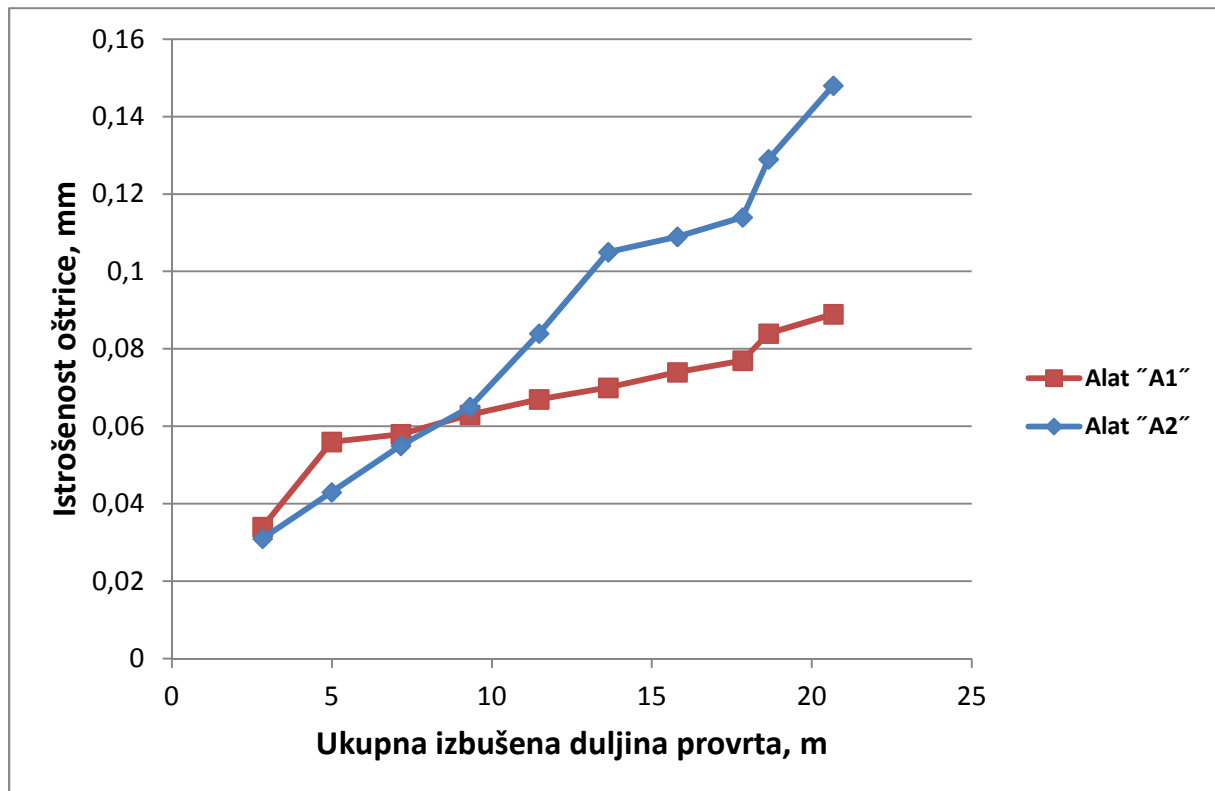
Kao i kod obrade metalnih materijala, trošenje alata je neizbježno i kod obrade nehomogenih materijala primjerice kamena. Bušenjem određenog broja provrta na različitim kamenima s različitim parametrima procesa, različitim geometrijama i materijalom svrdla te direktnim mjerenjem istrošenosti alata kao indirektnim mjerenjima sila i struja motora, dobiveni su podaci koji se mogu koristiti za procjenu stupnja istrošenosti alata.

Kada se uzima u obzir direktno mjerenje istrošenosti dvaju različitih alata, slikanjem rezne oštrice pomoću kamere, vidljivo je da alat s oznakom "A2" ima nešto veću vrijednost trošenja stražnje površine, što je rezultat različitih vršnih kutova i različite strukture tvrdog metala od kojeg je izrađena rezna oštrica, koji u slučaju alata "A2" dovode do povećanog iznosa trošenja. Razlika u istrošenosti može se vidjeti na slici 75 na kojoj je prikazana istrošenost oštrice nakon 1378 izbušenih provrta.



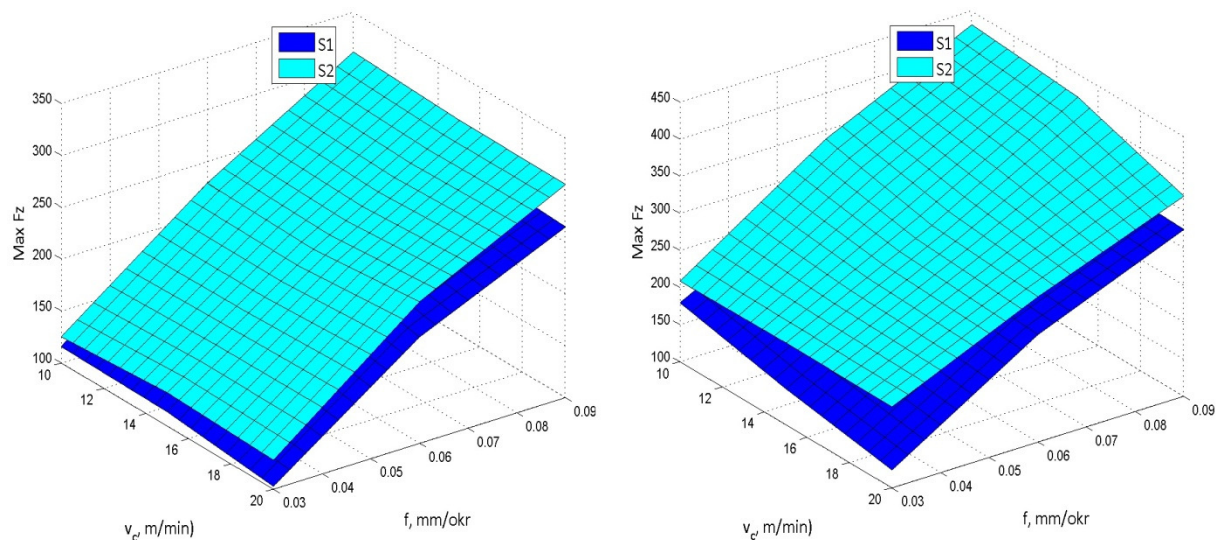
Slika 79. Usporedba oštrice "2" alata "A1"(lijevo) i alata "A2" (desno)

Primjer razlike u istrošenosti alata može se i prikazati grafički gdje se može vidjeti iznos trošenja u odnosu na ukupnu izbušenu duljinu. Usporedba rezultata na takav način može se vidjeti na slici 76.



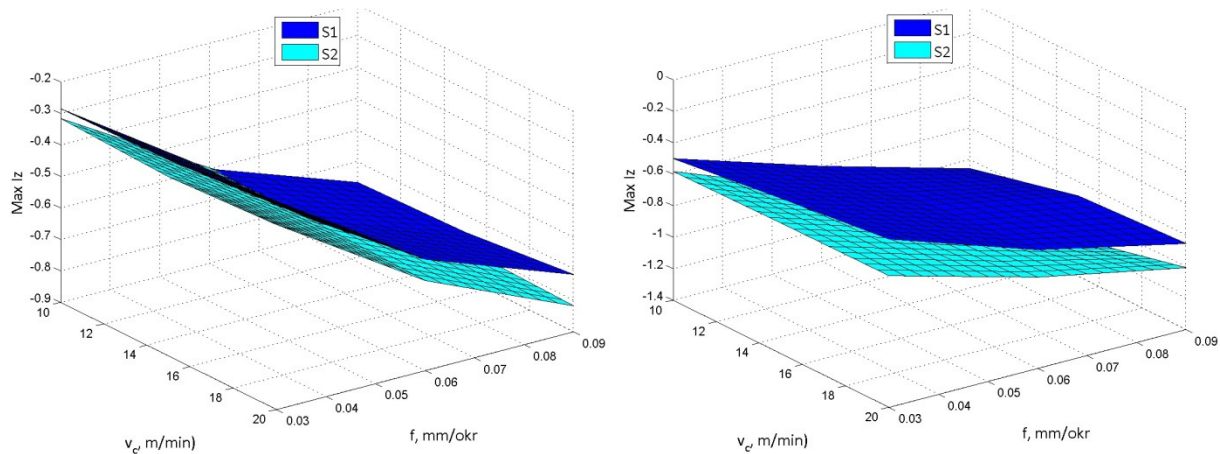
Slika 80. Usporedba trošenja oštrice "2" alata "A1" i alata "A2"

Kod usporedbe posmičnih sila koje se javljaju prilikom procesa bušenja vrlo lako se može zaključiti kako s porastom trošenja stražnje površine i rezne oštrice alata rastu i sile u smjeru posmične osi. Na taj način pomoću sila se može vrlo dobro procijeniti stupanj istrošenosti alata. Vrijednosti sila kod svrdla "A1" i "A2" se razlikuju zbog različite geometrije, ali i različite strukture tvrdog metala. Može se primijetiti kako je posmična sila, kada se koristi svrdlo "A2", veća nego kod svrdla "A1". Još veća razlika se može vidjeti kada se postigne stupanj istrošenosti "S2" koji je kod svrdla "A2" većeg intenziteta nego kod svrdla "A1". Na slici 77 može se vidjeti razlika u iznosu posmične sile kod jednog i drugog svrdla. Može se vidjeti kako maksimalni iznosi sile kod svrdla "A2" dostižu i vrijednost od 430 N pri stupnju istrošenosti "S2", dok za isti stupanj istrošenosti vrijednosti sile za svrdlo "A1" iznose do 320 N.



**Slika 81. Usporedba posmičnih sila svrdla "A1" (lijevo) i svrdla "A2" (desno)**

Kako smo ranije zaključili da su vrijednosti posmičnih sila u korelaciji s vrijednostima struja posmičnog motora, za istu takvu usporedbu može se koristiti i vrijednosti struje posmičnog motora. Iz slike 78 može se vidjeti kako struje kod svrdla "A2" prelaze vrijednosti od 1 A kod stupnja istrošenosti "S2" dok su kod svrdla "A1" maksimalne vrijednosti struja posmičnog motora 0,8 A.



**Slika 82. Usporedba struja posmičnog motora kod svrdla "A1" (lijevo) i svrdla "A2" (desno)**

## 8. ZAKLJUČAK

Razvojem obradnih strojeva i alata sve se više napora ulaže u istraživanje načina zadržavanja ili poboljšavanja kvalitete proizvoda i povećanje konkurentnosti na tržištu. Jedan od načina na koji se može doprinijeti tome je poznavanje utjecaja geometrije alata, parametara obrade, ali i vrste materijala na trošenje alata. Kod obrade odvajanjem čestica kamena to je još više izraženo zbog nehomogenosti strukture materijala i njezinog utjecaja na trošenje alata.

U ovom radu istraživao se utjecaj parametara obrade, materijala oštrice i geometrije svrdla na trošenje pri bušenju tri različite vrste kamena. Mjerenjem vrijednosti posmične sile, koja se pojavljuje prilikom bušenja, došlo se do zaključka kako najveći utjecaj na povećanje iste ima upravo povećanje posmaka. Povećanje brzine rezanja nije imalo značajan utjecaj na vrijednost sile. S porastom vrijednosti sile u posmičnom smjeru rasla je i vrijednost struje posmičnog motora. Dobivanjem ovih podataka može se procijeniti utjecaj parametara obrade na sile koje se pojavljuju prilikom rezanja i spriječiti prevelika naprezanja alata. Uz mjerenje sile i struje provodilo se snimanje rezne oštrice svrdla nakon određenog broja izbušenih provrta. Nakon što se odredio dovoljan stupanj istrošenosti, mjerenjem istrošenosti stražnje površine i rezne oštrice, provodila su se mjerenja sile i struja motora s istrošenim svrdlom. Iz dobivenih podataka može se zaključiti kako porastom trošenja rezne oštrice rastu i sile koje se pojavljuju prilikom obrade, a s njima i struje motora. S tim podacima može se utvrditi intenzitet trošenja oštrice reznog alata u odnosu na vrijednosti posmične sile ili struje motora kod bušenja. Bušenjem s dva različita svrdla dobiveni su podaci o utjecaju geometrije svrdla i strukture materijala na trošenje rezne oštrice pojedinog svrdla. Kako se ispitivanje provodilo na tri kamena različite strukture dobiveni su podaci iz kojih se može izraziti utjecaj obrađivanog materijala na sile koje se pojavljuju prilikom procesa, a samim time i na trošenje alata.

Buduća istraživanja trošenja kod bušenja kamena bi se mogla provoditi s većim brojem kamena različitih struktura, korištenjem svrdla s više različitih materijala i geometrija, stupnjeva istrošenosti te više parametara obrade. Na taj način dobio bi se još bolji uvid u utjecaj pojedinog parametra na intenzitet trošenja oštrice alata.

## LITERATURA

- [1] *Lado Pletikosić*: Primjena kamena u graditeljstvu, diplomski rad, Građevinski fakultet, Zagreb, 2007.
- [2] *Mikell P. Groover*: Fundamentals of modern manufacturing, Materials, Processes, and Systems, Fourth Edition, Lehigh University, 2010, United States of America
- [3] *Postupci obrade odvajanjem*: Autorizirana predavanja Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [4] *Šime Šavar*: Obrada odvajanjem čestica II. dio, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1987.
- [5] *Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem*: Predavanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [6] *Krešimir Grilec, Vinko Ivušić*: Tribologija, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [7] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3000>., pristupano svibanj 2015.
- [8] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Oksidacija>, pristupano ožujak 2015.
- [9] *Igor Vujović*: Degradacija svojstva materijala - predavanja, Pomorski fakultet, Sveučilište u Splitu, Split, 2014.
- [10] <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~atonejc/4%20NNDifuzija.pdf>, pristupano ožujak 2015.
- [11] *Vinko Ivušić, Mladen Franz*; Materijali I, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006/2007.
- [12] *S. Škorić*: Obrada odvajanjem čestica, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [13] *Bojan Kraut*: Krautov strojarški priručnik, Sajema d.o.o., Zagreb 2009.
- [14] *Huseyin M. Ertunc, Kenneth A. Loparo, Hasan Ocak* : Tool wear condition monitoring in drilling operations using hidden Markov models (HMMs) Electrical Engineering and Computer Science, Case Western Reserve University, USA. 1 October 2000
- [15] *Ersoy A, Buyuksagic IS, Atici U.*: Wear characteristics of circular diamond saws in the cutting of different hard abrasive rocks, Journal of Wear 259, 2004.
- [16] *István Gábor Gyurika*: Optimal opportunities at stone machining processes done by diamond tool, Periodica Polytechnica, 2011.



- [17] *Ulrik Beste, Staffan Jacobson*: Micro scale hardness distribution of rock types related to rock drill wear, Tribomaterials Group at The Ångström Laboratory, Uppsala University, 2003.
- [18] *Irfan Celal Engin*: Theories on Rock Cutting, Grinding and Polishing Mechanisms, Afyon Kocatepe University, Turkey, svibanj, 2013.
- [19] *R.F. Hamadea, S.P. Manthrib, F. Pusavecc, K.A. Zacnyd, L.A. Taylore, O.W. Dillon Jr. b, K.E. Rouchb, I.S. Jawahirb*: Compact core drilling in basalt rock using PCD tool inserts: Wear characteristics and cutting forces, Journal of Materials Processing Technology, 22. ožujak, 2010.
- [20] *Matti, H.*: Rock Excavation Handbook, Sandvik Tamrock Corp., 1999.
- [21] *W. Polini, S. Turchetta*: Monitoring of diamond disk wear in stone cutting by means of force or acceleration sensors, Springer-Verlag London, 6 October 2006.
- [22] *H.K. To'nshoff, H. Hillmann-Apmann, J. Asche*: Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications, Institute for Production Engineering and Machine Tools, University of Hannover, Schlosswender Strasse 5, Hannover, Germany, 2002.
- [23] *M. Bonneau*: Mechanical properties of special ternary alloy bonds compared with cobalt bonds, Conference on PM Diamond Tools, Montreux, 1997.
- [24] *A. Ersoy*: A critical review of factors influencing the wear of thermally stable diamond (TSD) rock drilling bits, Mining Congress of Turkey, 1997.
- [25] *R. Schulze*: Dr-Ing Dissertation. , Trennschleifen von Hartgestein, Universität Hannover, 1980.
- [26] *W. Polini and S. Turchetta*: Monitoring of diamond mill wear in time domain during stone cutting using cutting force measurements, research article, Università degli Studi di Cassino, Italy, 1 December 2008.
- [27] *Vinod K. Sarin, Daniele Mari, Christophe E. Nebel*: Comprehensive hard materials; Hard metals, ceramics, super hard materials, Volume 1 – 3, Elsevier, e - knjiga, pristupano 2015.
- [28] *U. Beste, A. Lundvall, S. Jacobson*: Micro-scratch evaluation of rock types - a means to comprehend rock drill wear, Uppsala University, Uppsala, Sweden, 2004.
- [29] <http://www.ipmd.net/articles/001984.html>, pristupano svibanj 2015.
- [30] *U. Beste, T. Hartzell, H. Engqvist, N. Axén*: Surface damage on cemented carbide rock-drill buttons, Uppsala University, Uppsala, Sweden, 2001.
- [31] *Zacny, K.A., Cooper, G.A.*: Coring basalt under Mars low pressure conditions, The International Journal of Mars Science and Exploration, 2007.

- [32] *Jani Kenda, Janez Kopač*: Diamond Tools for Machining of Granite and Their Wear University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Slovenia, 06.11.2009.
- [33] *Miho Klaić, Tomislav Staroveški, Toma Udiljak*: Tool wear classification using decision trees in stone drilling applications: a preliminary study, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Ivana Lucica 5, 10000 Zagreb, Croatia, 2013.
- [34] *Danko Brezak, Tomislav Staroveški*: Regulacija obradnih sustava, predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [35] *Erkki Jantunen*: A summary of methods applied to tool condition monitoring in drilling, Technical Research Centre of Finland, Finland, 2002.
- [36] *Danko Brezak*: Razvoj hibridnog estimatora trošenja alata i metoda vođenja alatnog stroja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [37] *R. Teti, K. Jemielniak, G. O'Donnell, D. Dornfeld*: Advanced monitoring of machining operations, CIRP Annals - Manufacturing Technology 59, 2010.
- [38] *Toma Udiljak, Tihomir Mulc*: Monitoring of cutting tool wear by using control system signal, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [39] *P.W. Prickett\*, C. Johns*: An overview of approaches to end milling tool monitoring, Cardiff School of Engineering, University of Wales, Cardiff, 1998.
- [40] <http://www.kistler.com/hr/en/products/components/force-sensors/>, pristupano svibanj 2015.
- [41] *K. Jemielniak*: Signal Transmission and Conditioning (Commercial Tool Condition Monitoring Systems), Warsaw University of Technology, Institute of Manufacturing Engineering, Warsaw, Poland, 1999.