

Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje - utjecaj na sile rezanja kod bušenja kamena

Družinec, Dino

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:235:364495>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-23**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dino Družinec

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Dino Družinec

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Tomi Udiljaku na stručnim i korisnim smjericama tijekom izrade rada.

Posebno se zahvaljujem profesorima Danku Brezaku, Mihi Klaiću i Tomislavu Staroveškom na uloženom trudu, vremenu, savjetima i prenesenom znanju tijekom posljednje godine studija, a posebno tijekom izrade diplomskog rada.

Najviše se zahvaljujem obitelji, a posebno svojim roditeljima koji su mi omogućili studiranje, koji su uvijek bili uz mene i pružali mi najveću podršku tijekom studija.

Dino Družinec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DINO DRUŽINEC** Mat. br.: **0035202538**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje - utjecaj na sile rezanja kod bušenja kamena**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Cutting fluids - the influence on cutting forces at stone drilling**

Opis zadatka:

Preliminarnim istraživanjem provedenim u laboratoriju za alatne strojeve iz područja bušenja kamena je utvrđeno da se odvođenjem odvojenih čestica kamena iz zone obrade uz pomoć stlačenog zraka aksijalna sila smanjuje i do nekoliko puta. Pri tome je istrošenost reznih oštrica u usporedbi s postupkom bušenja bez odvođenja odvojene čestice značajno smanjena. U dostupnoj literaturi je malo znanstvenih radova vezanih uz temu odvođenja odvojenih čestica tijekom bušenja kamena koje pri tome koriste stlačeni zrak kao sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP).

U radu je potrebno:

1. Konstruirati i izraditi sustav za dobavu SHIP-a s mogućnošću regulacije tlaka i protoka različitih medija.
2. Izraditi programsku podršku za obradu signala i izdvajanje značajki procesa obrade.
3. Usporediti krivulje istrošenosti reznih oštrica svrdala iskorištenih tijekom bušenja kamena uz primjenu različitih vrsta SHIP-a.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:
04. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
10. srpnja 2019.
11. srpnja 2019.
12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Tomo Udiljak

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Kamen	1
1.1.1. Genetska klasifikacija kamena.....	2
1.1.2. Komercijalna podjela arhitektonsko građevinskog kamena	2
1.1.3. Struktura kamena	3
1.1.4. Tekstura kamena	4
1.1.5. Geološka svojstva kamena.....	5
1.1.6. Mehanička svojstva kamena utjecajna na obradu odvajanjem čestica	5
2. BUŠENJE	7
2.1. Parametri bušenja	9
3. TROŠENJE ALATA	12
3.1. Značajke procesa trošenja	12
3.2. Mehanizmi trošenja.....	14
3.2.1. Abrazijsko trošenje	15
3.2.2. Adhezijsko trošenje.....	16
3.2.3. Difuzijsko trošenje	17
3.2.4. Oksidacijsko trošenje	17
3.2.5. Plastična deformacija rezne oštrice.....	18
3.2.6. Umor površine	18
3.3. Oblici trošenja	18
3.3.1. Trošenje stražnje površine glavne rezne oštrice	19
3.3.2. Trošenje stražnje površine poprečne oštrice	20
3.3.3. Naljepak na prednjoj površini alata	20
3.3.4. Zarezno trošenje.....	21
3.3.5. Lom na glavnoj reznoj oštrici	21
3.3.6. Lom vrha rezne oštrice.....	22
3.3.7. Toplinska napuknuća	22
3.3.8. Trošenje fazete svrdla	23
3.3.9. Lom svrdla	23
3.4. Postojanost oštrice reznog alata	24
4. SREDSTVO ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE (SHIP).....	27
4.1. Vrste SHIP-a	27
4.2. Način dovođenja SHIP-a.....	28
4.3. Utjecaj SHIP-a na odvojenu česticu kod bušenja kamena.....	28

5. NADZOR ISTROŠENOSTI OŠTRICE ALATA	33
5.1. Sustav nadzora obradnog procesa	33
5.2. Mjerenje signala	37
5.2.1. Sile rezanja i moment glavnog vretena	38
5.2.2. Jakosti struje motora glavnog i posmičnih prigona	38
5.2.3. Vibracije	39
5.2.4. Akustična emisija	39
5.3. Filtriranje signala	40
5.4. Značajke trošenja	40
5.5. Odabir značajki trošenja	42
5.6. Model indirektnog nadzora procesa trošenja	42
6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA	44
6.1. Eksperimentalni postav za regulaciju SHIP-a	44
6.1.1. Konstrukcija postava	44
6.1.2. Hidraulički i pneumatski elementi postava	44
6.1.3. Servo ventil	47
6.1.4. Elektronički dio postava	49
6.2. Eksperimentalni postav za bušenje i mjerna oprema	52
6.2.1. Konstrukcija stroja	52
6.2.2. CNC sustav	54
6.2.3. Mjerni sustavi stroja	55
6.2.3.1. Senzor sila	57
6.2.3.2. Senzor vibracija	58
6.2.3.3. Senzor akustične emisije	59
6.2.3.4. Vizijski sustav direktnog nadzora trošenja	60
6.2.4. Korisničko sučelje mjernog sustava	61
7. EKSPERIMENT	62
7.1. Ispitni uzorci	62
7.2. Ispitno svrdlo	63
7.3. Režimi obrade	64
7.4. Probna mjerenja	65
8. ZAKLJUČAK	69
LITERATURA	70
PRILOZI	73

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz svrdla [12].....	7
Slika 2. Elementi spiralnog svrdla [13].....	8
Slika 3. Geometrija spiralnog svrdla [5]	9
Slika 4. Parametri zahvata postupka bušenja [5].....	11
Slika 5. Tipska krivulja trošenja reznih alata [18]	13
Slika 6. Parametri trošenja oštrice reznog alata [19].....	14
Slika 7. Udjeli procesa trošenja u ukupnom trošenju [18]	14
Slika 8. Mehanizmi trošenja na alatu tijekom obrade [12]	15
Slika 9. Podjela abrazijskog trošenja ovisno o strukturi tribosustava [5]	16
Slika 10. Adhezijsko trošenje [5]	16
Slika 11. Difuzijsko trošenje [5]	17
Slika 12. Oksidacijsko trošenje [5]	17
Slika 13. Najčešći oblici trošenja i uobičajeni položaji njihove pojave [19]	19
Slika 14. Trošenje stražnje površine glavne rezne oštrice a) prema [22], b) prema [23].....	19
Slika 15. Trošenje stražnje površine poprečne oštrice [12]	20
Slika 16. Naljepak na prednjoj površini alata a) prema [22], b) prema [24].....	20
Slika 17. Zarezo trošenje a) prema [22], b) prema [23]	21
Slika 18. Lom na glavnoj reznoj oštrici a) prema [22], b) prema [24].....	21
Slika 19. Lom vrha rezne oštrice lijevo a) prema [22], b) prema [24].....	22
Slika 20. Toplinska napuknuća a) prema [25], b) prema [12].....	22
Slika 21. Trošenje fazete svrdla a) prema [22], b) prema [26].....	23
Slika 22. Lom svrdla [22].....	23
Slika 23. Utjecaj parametara obrade na iznos trošenja i temperaturu rezanja [16]	24
Slika 24. Krivulje trošenja i ovisnost vijeka trajanja alata o brzini rezanja [19]	25
Slika 25. Grafički prikaz Taylorove jednadžbe [16]	25
Slika 26. Primjer dovođenja i primjena SHIP-a [27]	28
Slika 27. Ovisnost sile o dubini bušenja – sa i bez predbušenja [28]	29
Slika 28. Utjecaj komprimiranog zraka na dubini bušenja od 12 milimetara [28]	30
Slika 29. Međusobni utjecaj brzine rezanja, sile i učestalosti vrtnje [29].....	31
Slika 30. Međusobni utjecaj momenta, sile i učestalosti vrtnje [29].....	31
Slika 31. Prikaz sile u ovisnosti o području ispiranja [30].....	32
Slika 32. Pristupi nadzoru istrošenosti reznog alata i tvrdoće obratka [5]	35
Slika 33. Elementi sustava nadzora [31]	36
Slika 34. Shematski prikaz sustava nadzora istrošenosti reznog alat [33]	43
Slika 35. Servo ventil	48
Slika 36. Elementi sklopa Tinkerforge [38]	49
Slika 37. Postav za regulaciju SHIP-a 1	50
Slika 38. Postav za regulaciju SHIP-a 2.....	51
Slika 39. Eksperimentalni postav [33]	52
Slika 40. Prikaz unutrašnjosti tro – osne glodalice [12].....	53
Slika 41. Modul glavnog prigona [5]	54
Slika 42. Elementi upravljačkog sustava [5]	55
Slika 43. Prikaz postojećih senzora na ispitnom stroju [5]	56
Slika 44. Senzor sila i pripadajuće nabojno pojačalo [33]	57

Slika 45. Senzor vibracija i pripadajuće nabojno pojačalo [33].....	58
Slika 46. Senzor akustične emisije i pripadajući sklop za prihvatanje signala akustične emisije [33]	59
Slika 47. a) Industrijska kamera prema [39], b) Telecentrični objektiv prema [40], c) Prsten za rasvjetu prema [41].....	60
Slika 48. Alat za završnu pripremu uzoraka [5].....	63
Slika 49. Ispitno svrdlo [12]	64
Slika 50. Sile i moment kod prvog bušenja.....	65
Slika 51. Sile i moment kod drugog bušenja.....	66
Slika 52. Sile i moment kod trećeg bušenja	67
Slika 53. Sile i struja kod bušenja bez primjene SHIP-a [5]	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Teksture stijena prema različitom postanku stijena [9].....	5
Tablica 2. Trošenje i postojanost oštrice reznih alata [18].....	12
Tablica 3. Odnos sila bušenja – sa i bez predbušenja [28].....	29
Tablica 4. Podjela značajki trošenja [34]	41
Tablica 5. Hidraulički elementi	45
Tablica 6. Pneumatski elementi	45
Tablica 7. Karakteristike pumpe	46
Tablica 8. Karakteristike akumulatora - ekspanzijske čahure.....	46
Tablica 9. Karakteristike senzora protoka [36]	46
Tablica 10. Karakteristike servo - motora [37]	47
Tablica 11. Elektronički elementi	49
Tablica 12. Osnovne tehničke karakteristike ispitnog stroja [5].....	53
Tablica 13. Veličine i mjerni sustavi potrebni za provođenje eksperimenta [5].....	56
Tablica 14. Tehničke karakteristike senzora sila i pripadajućeg nabojnog pojačala [5].....	57
Tablica 15. Tehničke karakteristike senzora vibracija i pripadajućeg nabojnog pojačala [5] .	58
Tablica 16. Tehničke karakteristike senzora akustične emisije i pripadajućeg sklopa za prihvatanje signala akustične emisije [5]	59
Tablica 17. Tehničke karakteristike vizijskog sustava [5]	60
Tablica 18. Mehanička svojstva ispitnih uzoraka [5].....	62
Tablica 19. Početni uvjeti i režimi obrade.....	64
Tablica 20. Usporedba momenata za različite protoke	68
Tablica 21. Usporedba aksijalne i rezultantne sile bušenja za različite protoke	68

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
2φ	°	vršni kut svrdla
a_p	mm	dubina rezanja
A_{UK}	mm ²	ukupna površina presjeka odvojene čestice
A_X	mm ²	površina presjeka odvojene čestice po reznoj oštrici
b	mm	širina odvojene čestice
C_{L_f}	m/min	konstantna Taylor-ove jednadžbe koja označava brzinu rezanja pri kojoj postojanost alata iznosi 1 m gibanja u smjeru posmaka
C_T	m/min	konstantna Taylor-ove jednadžbe koja označava brzinu rezanja pri kojoj postojanost alata iznosi 1 minutu
C_V	-	konstanta ovisna o materijalu obratka
d, D	mm	promjer svrdla
f	mm	Posmak
f_z	mm	posmak po jednoj oštrici
h	mm	debljina odvojene čestice
k_o	-	koeficijent smanjenja brzine prvi povećanju dubine
KB	mm	širina kratera
KM	mm	udaljenost središta kratera od oštrice
KT	mm	dubina kratera na prednjoj površini alata
K_r	°	napadni kut
L_f	m	postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja
m, m_f	-	eksponent Taylor-ove jednadžbe
n	min ⁻¹	broj okretaja/učestalost vrtnje
q_l	l/min	Protok
R_a	μm	parametar hrapavosti obrađene površine
S	min ⁻¹	brzina vrtnje
T	min	postojanost oštrice alata/vijek trajanja alata
v_c	m/min	brzina rezanja
v_f	mm/min	posmična brzina
VB	mm	širina trošenja stražnje površine alata
z	mm	broj reznih oštrica
α	°	kut stražnje površine alata
β	°	kut klina ili kut oštrenja
γ	°	kut prednje površine alata
ω	°	kut spiralnog žlijeba ili kut uspona spiralnog svrdla

SAŽETAK

U posljednje vrijeme veliki se napor ulaže u istraživanja postupka obrade odvajanjem čestica skupine materijala nehomogene i anizotropne strukture, kakav je i kamen. Poznato je da na postupke obrade odvajanjem čestica izrazito negativno utječe oblik i odvođenje odvojene čestice iz zone obrade. Kamena odvojena čestica sitne je i praškaste strukture te ju je vrlo teško evakuirati iz zone obrade. Preliminarna istraživanja u laboratoriju za alatne strojeve pokazala su da njenim utjecajem, sila tijekom bušenja može narasti i do nekoliko puta, što rezultira intenzivnijim trošenjem alata i slabom energetsom učinkovitošću.

U sklopu ovog diplomskog rada projektiran je i izrađen sustav za dobavu sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje koji ima mogućnost regulacije tlaka i protoka različitih medija. Nadalje, izrađena je programska podrška za obradu signala, filtriranje i izdvajanje značajki procesa obrade, te je na samom kraju proveden eksperimentalni dio rada s ciljem utvrđivanja koje sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje i u kojoj mjeri ima najveći utjecaj na sile kod bušenja. Osnovni zadatak je minimizirati intenzitet trošenja reznih oštrica alata.

Ključne riječi: kamen, obrada odvajanjem čestica, sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, nadzor istrošenosti oštrice alata

SUMMARY

Lately, great efforts are being invested into research of material removal (machining) processes in relation to materials characterised by non-homogeneous and anisotropic structure, such as stone. Machining processes are very negatively influenced by the type and evacuation of the chips from the processing zone. The chip generated during stone machining has a minute and dusty structure, making its evacuation from the machining zone a very demanding task. Preliminary research at Machine tool laboratory showed that under the chip influence the drilling force could grow several times, resulting in a more intense tool wear and poor energy efficiency.

Within the frame of this graduate thesis, a system for obtaining cutting fluid for cooling, lubricating and chip flushing has been designed and developed. The system has the ability to control the pressure and volume of different media. Furthermore, software for signal processing, filtration and significant feature extraction was developed. Finally, an experimental part of the work was carried out aiming to determine which cutting fluid and at what extent had the greatest impact on drilling forces. The basic task is to minimize the wear intensity of cutting tools.

Key words: stone, material removal, cooling, lubrication and flushing media, tool wear monitoring

1. UVOD

Kamen je jedan od najvažnijih pratilaca evolucije ljudskog roda. Različite strukture prirodnih kamenih materijala i dalje predstavljaju osnovu za ljudsko izražavanje i oblikovanje [1].

Na samim počecima, manji ili veći komadi kamena za različite potrebe koristili su se u obliku kako su bili pronađeni u prirodi. Kada je iskorišteno sve veće i oštrije kamenje iz prirode, počelo se birati kamenje koje je bilo djelomično ili u potpunosti zakopano u zemlju. Kasnije se odlučivalo je li svaki pronađeni kamen pogodan za uporabu, ili je bilo potrebno pronaći neki kamen veće tvrdoće i većih dimenzija, kojeg bi se naknadno obradilo. Čišćenje i brušenje kamena bile su prve obrade kamena u povijesti. Kamen se koristio za izradu raznih građevina, utvrda, oružja, oruđa, pomagala, kulturnih spomenika, nakita, itd [2].

Također se koristi kao građevni materijal od davne prošlosti pa sve do danas. Glavna prednost i karakteristika prirodnog kamena je njegova trajnost [3].

Nekada se kamen primjenjivao kao nosivi i potporni element raznovrsnih struktura, dok je danas njegova primjena više orijentirana na dekorativno - zaštitnu ulogu. Moderna upotreba kamena obuhvaća izradu interijera, eksterijera, stubišta i ostalih sadržaja. Porast upotrebe kamena, posljedica je njegove dugotrajnosti, kvalitete i otpornosti na trošenje zbog strukturnih i ostalih dobrih svojstava [4].

1.1. Kamen

Kamen se zbog načina eksploatacije, a velikim dijelom i zbog strukture i sastava, može djelomično iskoristiti kao arhitektonsko građevinski kamen. Od ukupne eksploatirane sirovine, čak 51 % udjela čini neupotrebljivi dio za arhitektonsko - građevni kamen [5].

Arhitektonsko – građevni kamen predstavlja posebnu vrstu kamena, kojemu je osnovna zadaća udovoljiti dekorativnim zahtjevima. Bere se u blokovima, a nakon toga slijede procesi piljenja i daljnje obrade, čime se dobivaju kameni elementi. Ima dobra fizikalna i mehanička svojstva, te dekorativnu vrijednost, pa se široko primjenjuje u graditeljstvu i kiparstvu za izradu grube i fine klesarije. Koristi se kao zidani element, u obliku raznovrsnih ploča i profila, za unutarnja i vanjska oblaganja, interijer, te kao zaštitni element građevnih objekata [6].

1.1.1. Genetska klasifikacija kamena

Stijene koje grade litosferu ili zemljinu koru, prema postanku ili genezi dijele se prema [4] u tri skupine:

- magmatske ili eruptivne stijene,
- sedimente stijene,
- metamorfne stijene.

Magmatske ili eruptivne stijene nastaju kristalizacijom ili očvrscućem magme, koja se hladi nakon izbijanja iz zemljine unutrašnjosti prema ili na površinu zemljine kore i na takav način poprima konačan oblik. Ako se takve stijene formiraju u dubljim slojevima litosfere, tada se govori o plutonskim stijenama [7].

Sedimentne stijene predstavljaju najraširenije stjenске mase na površini Zemlje. Nastaju taloženjem, te kasnijom litifikacijom ili okamenjivanjem na samoj površini litosfere uslijed djelovanja mehaničkih, kemijskih i biokemijskih procesa. Primjeri ove skupine stijena su: šljunak, pijesak, konglomerati, breče, pješčenjaci, vapnenac i dolomiti [7].

Metamorfne stijene nastale su preobrazbom iz magmatskih ili sedimentnih stijena. Pokretači za proces preobrazbe su temperatura, tlak i kemijski aktivni fluidi. Zbog svoje složene strukture i posebnog izgleda izrazito su cijenjene [7].

1.1.2. Komercijalna podjela arhitektonsko građevinskog kamena

Podjela se temelji na petrološkim značajkama stijena, a obuhvaća značajke kamena s pogleda fizikalno – mehaničkih i kemijskih svojstava, kao što su: tehnologija obrade, trajnost, načina eksploatacije i primjena. Nastala je na temelju iskustva i rada s kamenom [8].

Najzastupljenija podjela arhitektonsko - građevnog kamena u praksi, temelji se na mehaničkim svojstvima, pogotovo rezivosti, a prema [8] je:

- mramor,
- granit,
- kvarcit,
- kamen.

U mramor spadaju mramori s.s, vapnenci, travertini i oniksi. Sadrži kategorije tvrdih i srednje tvrdih karbonatnih, kalcitnih i dolomitnih stijena sedimentnog i metamorfnog postanka. Mogu se još podijeliti i na komercijalne mramore u koje spadaju metamorfne, karbonatne, kalcitne i dolomitne stijene. Homogene su strukture i škrljave teksture uz vrpčasti izgled [8].

U granit spadaju tvrde silikatne stijene, a glavne odlike su im trajnost i nepromjenjivost izgleda. Površine se većinom poliraju do visokog sjaja, uz mogućnost termičke obrade površina, a koriste se za oblaganje interijera i eksterijera [8].

Kvarcit čini zasebnu skupinu, zbog izrazite tvrdoće i velikog udjela količine kvarca. Glavna značajka kvarcita je velika statička čvrstoća, zbog zrnaste strukture koja je zubičasta, kao i kod mramora. Kemijski i temperaturno su otporni, vrlo su lagani i otporni su na atmosferije [8].

U kamen spadaju pješčenjaci, škrljavci, gnajsi, porfiri, bazalti, trahiti, vulkanske stijene, meki vapnenci, vapneni tufovi, konglomerati i breče. Meki vapnenci imaju visoki porozitet, iz čega slijedi da im je manja čvrstoća i otpornost na habanje. Prednost im je što se lako obrađuju, ali se ne poliraju jer ne primaju sjaj. Koriste se za oblaganje vertikalnih površina interijera. Škrljavci pripadaju niskometamornim stijenama koje imaju škrljavu teksturu i lapidoblastičnu strukturu, a mogu se lako cijepati u ploče debljine svega par milimetara. Pješčenjaci karbonatnog sastava mekši su od pješčenjaka silikatnog sastava i mogu se obrađivati kao arhitektonsko – građevni kamen [8].

1.1.3. Struktura kamena

Oblik i veličina pojedinih sastojaka određuju strukturu kamena. Sama struktura opisana je stupnjem kristaliniteta, te veličinom, oblikom i međusobnim odnosom minerala, a ovisi o načinu postanka stijene [6].

Vrste kamena eruptivnog postanka imaju granulastu ili zrnatu strukturu. Svi minerali u stijeni su jednakih veličina, a s obzirom na veličinu zrna, struktura je podijeljena na: vrlo sitno zrnata, sitno zrnata, srednje zrnata, krupno zrnata i vrlo krupno zrnata. Nadalje, postoje intersertalna i ofitska struktura, a one su karakteristične za hipoabisalne stijene. Takve stijene sadrže isprepletene štapičaste plagioklase, a u intercijama se nalazi vulkasno staklo (intersertalna) ili piroksen (ofitska) [6].

Porfirska struktura veže se uz vulkanske stijene, a sadrži idiomorfne i hipidiomorfne fenokristale ili utruske u osnovnoj masi koja može biti staklasta do mikrokristalna. Porfiroidna struktura ima posebnu vrstu zrnaste strukture, a u jednako zrnatoj osnovi pojavljuju se minerali puno većih dimenzija [6].

Klastična struktura, kamena sedimentalnog postanka, sastoji se od čestica koje su nastale mehaničkim trošenjem stijena. Čestice su vrlo različitog stupnja uglatosti, zaobljenosti i sferičnosti. Mogu biti složene tako da podupiru jedna drugu i nalaze se u dodiru, ili mogu biti uronjene u matriks. Veličine čestica dijele se u četiri grupe: glinene, prahne, pješčane i šljunčane. Organodetrinarna struktura, kamena sedimentalnog postanka karakteristična je za vapnence, sadrži fosilni detritus, a kalcitni skeleti organizma mogu biti raspoređeni da se međusobno podupiru ili su uronjeni u matriks. Kristalasta struktura, kamena sedimentalnog postanka sastoji se od kristaliziranih minerala, a karakteristična je za vaporite [6].

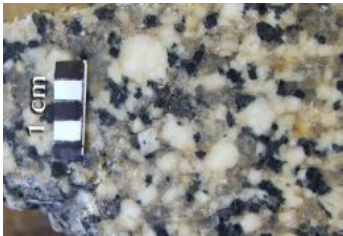
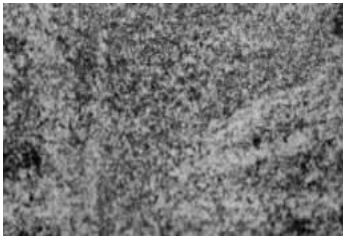
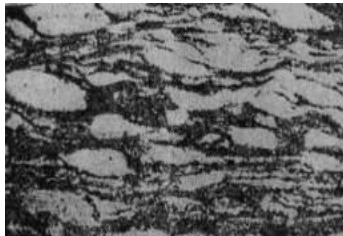





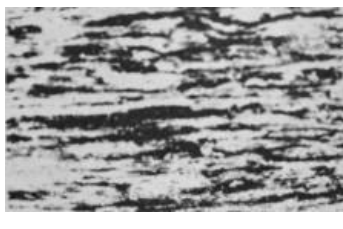
Postoji 5 različitih struktura kamena metamornog postanka. Granoblastična struktura postoji, ako se kamen sastoji od granoblasta (zrna) i približno su zrna jednakih veličina. Mramori i kvarciti imaju takvu strukturu. Lepidoblastična struktura postoji, ako u kamenu postoji listićavi minerali u većem udjelu od ostalih, a raspoređeni su paralelno. Nematoblastična struktura postoji, ako kamen sadrži štapičaste minerale. Porfiroblastična struktura sadrži krupnije kristale u sitnozrnatoj masi. Kataklastičnu strukturu krase minerali jače zahvaćeni drobljenjem nego prekrizacijom [6].

1.1.4. Tekstura kamena

Odnos prostornog rasporeda, orijentacije i sastojaka u kamenu određuju teksturu kamena. Način na koji su minerali smješteni u prostoru stijene, označuje tekstura. Tekstura ovisi o utjecaju vanjskih faktora, a različite vrste tekture prikazane su u tablici 1 [6].

U homogenoj teksturi, svi sastojci su ravnomjerno raspoređeni, bez naglašene prostorne orijentacije. U fluidalnoj teksturi, mineralni sastojci osnovne mase paralelno su poredani, te ukazuju na tok lave, kao i kod bazičnih eruptivnih stijena. Slojevitost predstavlja izmjenjivanje stijena jednog sastava i građe sa stijenama drugog sastava i građe. Škriljava tekstura vezana je uz metamorfne stijene, a pločasti ili listićavi mineralni su paralelno raspoređeni [6].

Tablica 1. Teksture stijena prema različitom postanku stijena [9]

Magmatske stijene	Sedimentne stijene	Metamorfne stijene
 <p>Homogena (masivna)</p>	 <p>Homogena (masivna)</p>	 <p>Škriljava</p>
 <p>Fluidalna</p>	 <p>Trakasta i slojevita</p>	 <p>Čvorasta (okasta)</p>
 <p>Vezikularna</p>	 <p>Brečasta</p>	 <p>Homogena (masivna)</p>

1.1.5. Geološka svojstva kamena

Geološka svojstva predstavljaju svojstva koja je stijena dobila u procesu nastajanja ili pak tijekom naknadnih procesa. Geološka svojstva prema [10] su: Kalavost (škriljavost), slojevitost, raspucanost, šupljikavost, propusnost, gustoća i anizotropnost.

1.1.6. Mehanička svojstva kamena utjecajna na obradu odvajanjem čestica

Od raznovrsnih i mnogobrojnih svojstava materijala koji imaju utjecaj na obradivost kamena postupcima obrade odvajanjem čestica, nabrojana su četiri najvažnija:

1. Tvrdoća materijala predstavlja otpornost materijala na prodiranje u isti, a to prodiranje najčešće vrši tvrdi materijal. Tvrdoća u slučaju kamena predstavlja otpornost istog da se deformira. Postoje izravne i neizravne metode za ispitivanje svojstava kamena, a same metode mogu se vršiti na terenu ili pak pod kontroliranim uvjetima u laboratoriju. Danas su neke od najpoznatijih i široko rasprostranjenih metoda mjerenja tvrdoće po Vickers-u, Brinell-u, Rockwell-u, Shore-u i Knoop-u. Svaka metoda temeljena je na različitim principima i postupcima mjerenja [5].

2. Abrazivnost je definirana kao sposobnost odupiranja trošenja kamena odnosno površinskog sloja uslijed kontakta stranog tijela. Stijene koje sadrže zrna tvrdih minerala povezanih sa slabije čvrstim vezivom imaju jako izražena abrazivna svojstva. Kvarcni pješčenjaci imaju izrazito visoku abrazivnost. Na abrazivnost najveći utjecaj imaju šupljine i pore. Mjeri se samo u kontroliranim laboratorijskim uvjetima prema normi HRN EN 14157:2008 [5].

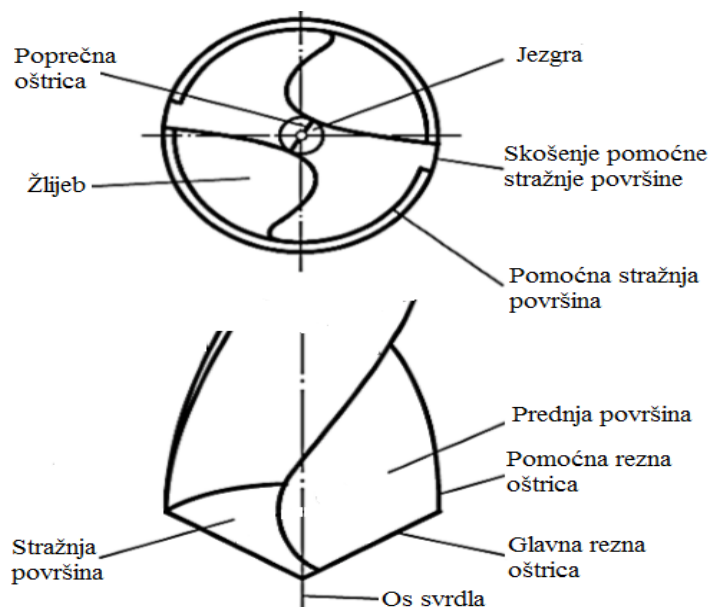
3. Tlačna čvrstoća jednaka je aksijalnom opterećenju ispitnog uzorka po jedinici površine prilikom koje nastaje deformacija ili lom uzorka. Metoda ispitivanja tlačne čvrstoće vrši se po normi HRN EN 1926:2008 [5].

Vrijednosti tlačne čvrstoće kamena iznose u granicama od 80 do 250 MPa, a ovise o vrsti i strukturi kamena. Ispitivanje tlačne čvrstoće vrši se opterećenjem ispitnog uzorka silom od 30 do 70% vrijednosti tlačne čvrstoće pri čemu se uzorak ponaša linearno elastično, nakon čega dolazi do promjene oblika te na kraju do loma uzorka. Veliki utjecaj na rezultate ispitivanja ima pozicija mikro pukotina unutar uzorka, također bitno utječe i mehanička stabilnost minerala, a ujedno i vrsta veziva između pojedinih minerala kamena. Jedna od najrelevantnijih i najvažnijih metoda ispitivanja mehaničkih svojstava kamena jest jednoosna tlačna čvrstoća [7].

4. Poroznost je svojstvo kamena koje definira udio pora unutar ispitnog uzorka. Kvantitativno se izražava kao odnos izražen u postotku volumena svih šupljina sadržanih u uzorku prema ukupnom volumenu ispitnog uzorka. Poroznost opisana na ovaj način poznata je kao apsolutna ili ukupna poroznost. Bitno je napomenuti postojanje otvorene ili relativne poroznosti koja uzima u obzir šupljine unutar kamena ispunjene vodom. Poroznost se ispituje u akreditiranim laboratorijima prema normi HRN EN 1936 [5].

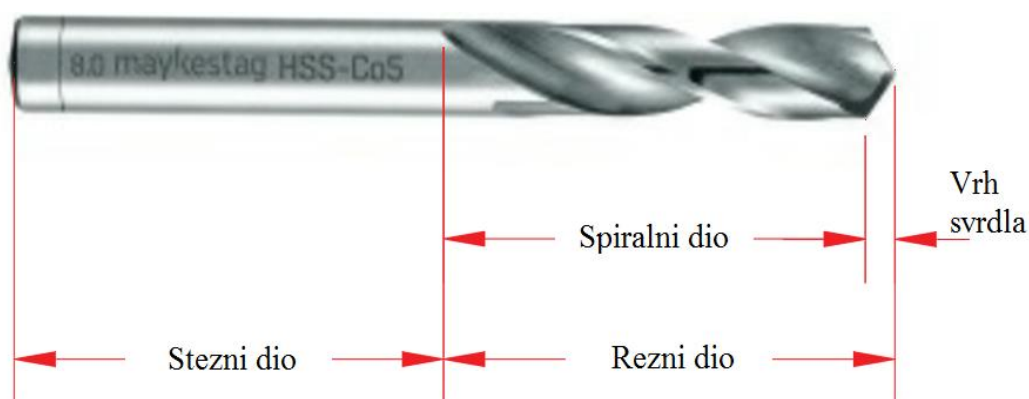
2. BUŠENJE

Bušenje je kontinuirani postupak obrade odvajanjem čestica kojim se izrađuju slijepi i prolazni provrti. Alat korišten za ovaj postupak je spiralno svrdlo, definirane rezne geometrije, a najčešće se sastoji od dvije rezne i jedne poprečne oštrice, slika 1. Kontinuirana rotacija svrdla predstavlja glavno, a kontinuirana translacija posmično gibanje, koje se izvodi istodobno s glavnim gibanjem i najčešće je pridruženo alatu, tj. svrdlu. Rezne oštrice alata su u konstantnom kontaktu s obrađivanim materijalom. Glavne karakteristike bušenja prema [11] su: promjenjiva brzina rezanja duž glavne oštrice, promjenjivi kutovi rezanja duž glavne oštrice, otežano odvođenje odvojene čestice i dovod SHIP-a i mala krutost sustava.



Slika 1. Shematski prikaz svrdla [12]

Spiralno svrdlo sastoji se od steznog i reznog dijela kako je prikazano na slici 2. Rezni dio podijeljen je na vrh svrdla i spiralni dio (žlijeb) kojem je temeljna funkcija vođenje i odvođenje čestica iz zone rezanja. Dva spiralna žlijeba sastavni su dio reznog dijela svrdla, a iznos im je pri vrhu svrdla najveći. Rezni dio svrdla izrađuje se od materijala veće tvrdoće od obrađivanog materijala, kao što su brzorezni čelik i tvrdi metal, a sastoji se od dvije glavne rezne oštrice međusobno spojene s poprečnom oštricom, koja zbog svoje geometrije i parametara obrade gnječi materijal [4].



Slika 2. Elementi spiralnog svrdla [13]

Stražnji kut α je kut kojeg zatvara stražnja površina svrdla s površinom okomitom na os svrdla. Kut β je kut između prednje i stražnje površine, a drugi naziv je kut klina ili kut oštrenja. Prednji kut γ je kut kojeg zatvara prednja površina svrdla s pravcem osi svrdla. Zadatak reznog alata je odvojiti određeni sloj materijala s obratka, uz ako je to moguće, skidanje što veće količine materijala u jedinici vremena. Također, zadatak je i oblikovati provrt zadanih dimenzija uz potrebnu kvalitetu obrade. Pouzdanost i trajnost alata, uz ranije spomenutu kvalitetu obrađene površine uvelike ovise o toplini koja se unosi postupkom obrade [14].

Zbog toga materijali alata moraju ispunjavati određene uvjete prema [14]:

- dovoljna temperaturna izdržljivost (da bi se zadržala tvrdoća na oštrici alata pri temperaturi koju određuje režim obrade),
- zadovoljavajuća čvrstoća i žilavost koja se suprotstavlja mehaničkim napreznjima statičke i dinamičke naravi,
- dovoljna čvrstoća i tvrdoća koja se suprotstavlja mehaničkom trošenju oštrice i površina na alatu koje su u direktnom dodiru s odvojenom česticom i obratkom.

Promjer svrdla (oznaka D) smanjuje se gledajući od vrha svrdla prema steznom dijelu zbog manjeg trenja i smanjenja momenta rezanja. Fazeta svrdla služi za vođenje svrdla i smanjenje trenja između izbušenog provrta i svrdla [5].

Kut vrha svrdla (2φ) ovisi isključivo o vrsti obrađivanog materijala i najčešće iznosi 120° . Kut spiralnog žlijeba ili kut uspona spiralnog svrdla (ω) najčešće iznosi $30^\circ \pm 5^\circ$ [5], [15].

Geometrija spiralnog svrdla prikazana je na slici 3. Pri konstantnom usponu spirale svrdla, prednji kut i kut spiralnog žlijeba svrdla najčešće su jednaki, a najveći su na obodu, dok se smanjuju promatrajući svrdlo od oboda prema središtu. Iznos stražnjeg kuta mijenja se duž rezne oštrice i ovisi o iznosu posmaka, tj. stražnji kut mora osigurati nepostojanje kontakta između stražnje površine i obrađivanog materijala [5].



Slika 3. Geometrija spiralnog svrdla [5]

2.1. Parametri bušenja

Zahtjevi na obradu iziskuju od postupka bušenja posebno podešene režime obrade. U nastavku su navedeni parametri [Slika 4] i režimi obrade [15], [16].

Dubina rezanja (a_p) pri bušenju u puni materijal jednaka je polovini promjera svrdla prema jednadžbi (3.1) [15]:

$$a_p = \frac{D}{2}. \quad (3.1)$$

Posmak (f) – predstavlja put kojeg prođe svrdlo u pravcu osi svrdla za jedan okretaj svrdla prema jednadžbi (3.2) [15]:

$$f = f_z \cdot z. \quad (3.2)$$

Posmična brzina (v_f) izražena u jedinici vremena računa se po jednadžbi (3.3) iz [15]:

$$v_f = f \cdot n = f_z \cdot z \cdot n. \quad (3.3)$$

U slučaju bušenja dubokih provrta potrebno je smanjiti posmak radi težeg odvođenja odvojene čestice iz zone rezanja i smanjene krutosti svrdla. Također je potrebno povremeno izvući svrdlo iz provrta kako bi se pročistio utor svrdla [4].

Brzina rezanja (v_c) računa se po jednadžbi (3.4) [15]:

$$v_c = D \cdot \pi \cdot n. \quad (3.4)$$

Okretanjem svrdla uz istovremeni aksijalni pomak, svrdlo radi složeno gibanje. Pri takvom gibanju oštrice svrdla ulaze u zahvat s materijalom i režu ga u obliku odvojene čestice. Promatrajući neku točku po duljini oštrice svrdla i po jednadžbi (3.4) zaključuje se, da je brzina rezanja nejednolika za pojedine dijelove rezne oštrice svrdla, dok je u osi svrdla jednaka nuli. Pri odabiru brzine rezanja uvijek se odabire maksimalna brzina jer ona određuje vijek trajanja svrdla [14].

Eksperimentalni izraz za brzinu rezanja pri bušenju koji uzima u obzir sve glavne faktore (C_V , x , y i m konstantne ovisne o materijalu obratka) obrade računa se prema jednadžbi (3.5) iz [4]:

$$v_c = \frac{C_V \cdot d^X \cdot k_o}{T^{m \cdot f} \cdot y}. \quad (3.5)$$

Ukupna površina presjeka odvojene čestice (A_{UK}) računa se prema (3.6) kao umnožak površine presjeka odvojene čestice po reznoj oštrici (A_X) i broja reznih oštrica (z) prema [5]:

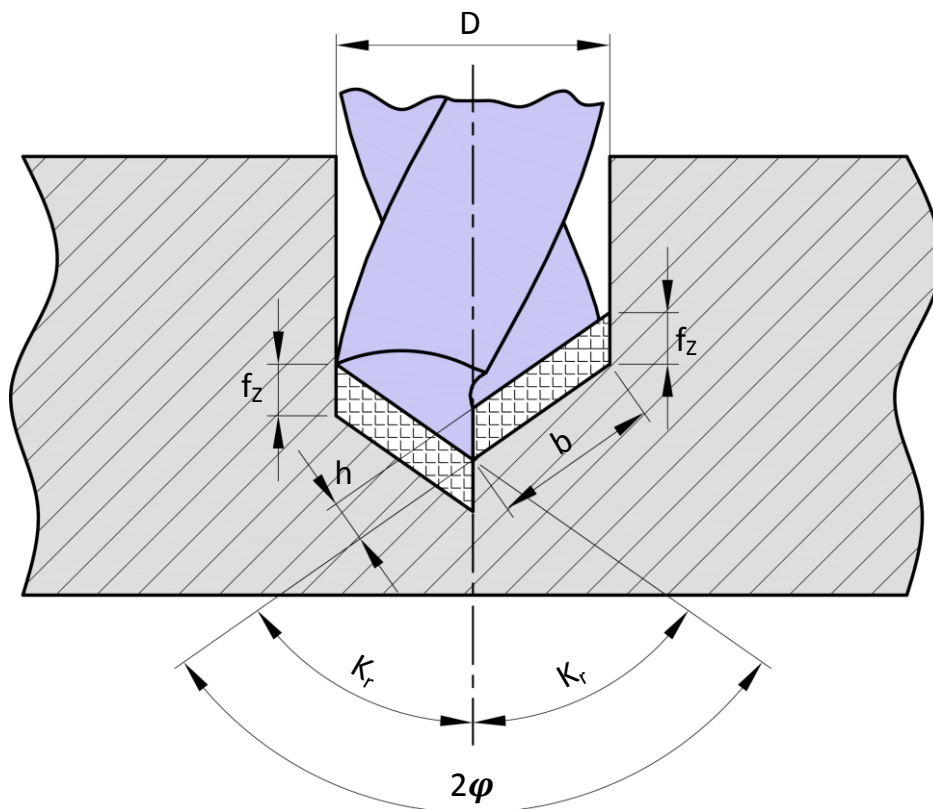
$$A_{UK} = A_X \cdot z. \quad (3.6)$$

Površina presjeka odvojene čestice po reznoj oštrici (A_X) računa se prema jednadžbi (3.7) kao umnožak dubine rezanja (a_p) i posmaka po reznoj oštrici (f_z). Također, može se izračunati i kao umnožak širine (b) i debljine (h) odvojene čestice, dobivenih iz jednadžbi (3.8) i (3.9) prema [5]:

$$A_X = a_p \cdot f_z = b \cdot h, \quad (3.7)$$

$$b = \frac{D}{2 \cdot \sin(\varphi)}, \quad (3.8)$$

$$h = f_z \cdot \sin(\varphi). \quad (3.9)$$



Slika 4. Parametri zahvata postupka bušenja [5]

3. TROŠENJE ALATA

U svrhu industrijske primjene, potrebno je odrediti prevladavajuće mehanizme trošenja, te smanjiti trenje i trošenje prema [17] iz navedenih razloga: produžetak vijeka trajanja radnih sustava, povećanje efikasnosti radnih sustava, smanjenje troškova održavanja, smanjenje troškova zastoja, poboljšanje pouzdanosti, itd.

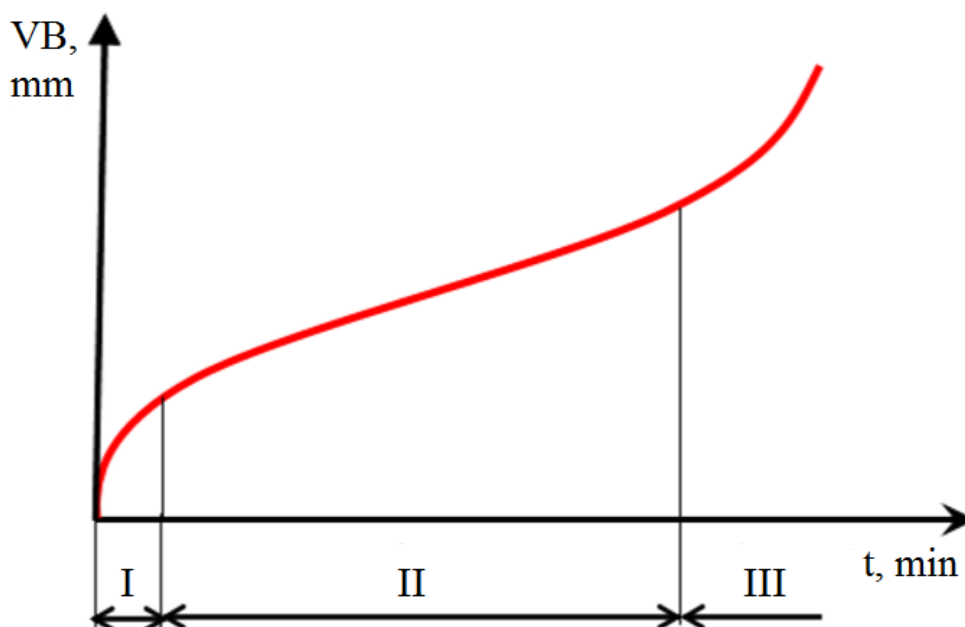
3.1. Značajke procesa trošenja

Sve procese obrade odvajanjem čestica, neizbježno prati i proces trošenja oštrice reznog alata. Proces obrade određen je ulazima, odnosno međusobnim odnosom ulaznih veličina, a kao jedna od posljedica opterećenja kojima je alat izložen tijekom procesa obrade, nastaje i proces trošenja. Tablica 2 prikazuje ulazne parametre i podjelu u tri skupine prema [18]:

Tablica 2. Trošenje i postojanost oštrice reznih alata [18]

Ulaz		Obradni proces	Izlaz	
Pripremak	Materijal		Obradak	Dimenzije
	Geometrija			Hrapavost obrađene površine
Alat	Materijal		Alat	Parametri trošenja stražnje površine alata
	Geometrija	Parametri kraterskog trošenja		
Uvjeti obrade	Parametri obrade	Obradni proces	Sila, šum, moment, snaga, temperatura,	
	Ostali uvjeti		...	

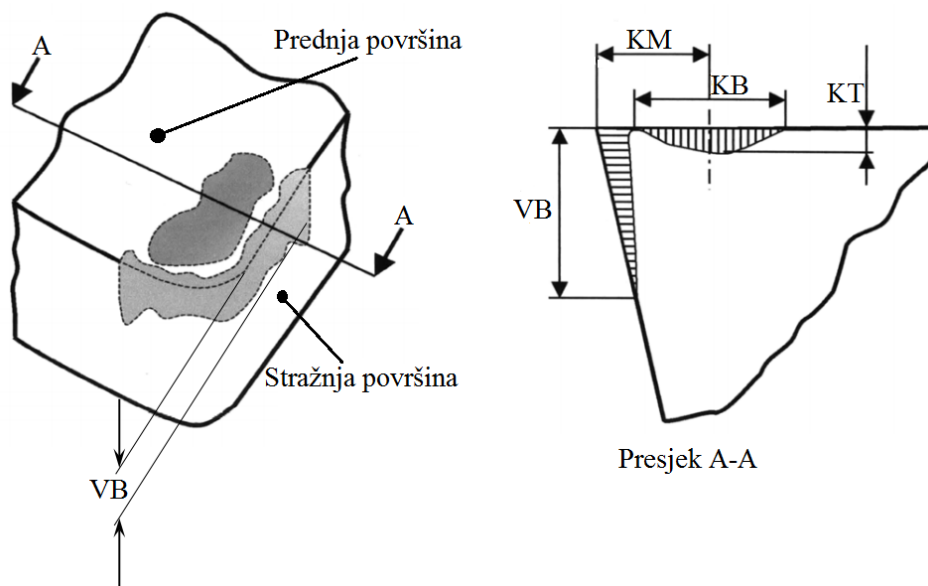
Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Svrdlo je za vrijeme rada podvrgnuto mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima koja uzrokuju promjenu geometrijskog oblika oštrice. Prema tome svrdla imaju određeni vijek trajanja u kojem se mogu upotrebljavati, kao što je prikazano na slici 5, gdje je navedena tipska krivulja trošenja reznih alata. U području I prikazan je početak trošenja alata (uhodavanje), područje II prikazuje linearnu promjenu trošenja u vremenu („normalno“ trošenje), dok područje III prikazuje istrošenje alata i nepogodnost (ne i nemogućnost) daljnje upotrebe alata (period naglog trošenja) [4].



Slika 5. Tipska krivulja trošenja reznih alata [18]

Oznaka VB predstavlja srednju širinu pojasa trošenja na stražnjoj površini alata izražene u milimetrima, a ona je ujedno i kriterij istrošenja alata. Uz ovaj kriterij istrošenosti alata postoje i drugi kriteriji istrošenja, kao što su dubina kratera KT (krater se nalazi na prednjoj površini alata), udaljenost središta kratera od početne oštrice KM i širine kratera oznake KB prikazano na slici 6 [19].

Krateri nastaju zbog previsokih temperatura obrade, a preporuka za izbjegavanje je smanjenje brzine obrade i odabir alata otpornijeg na trošenje [18].

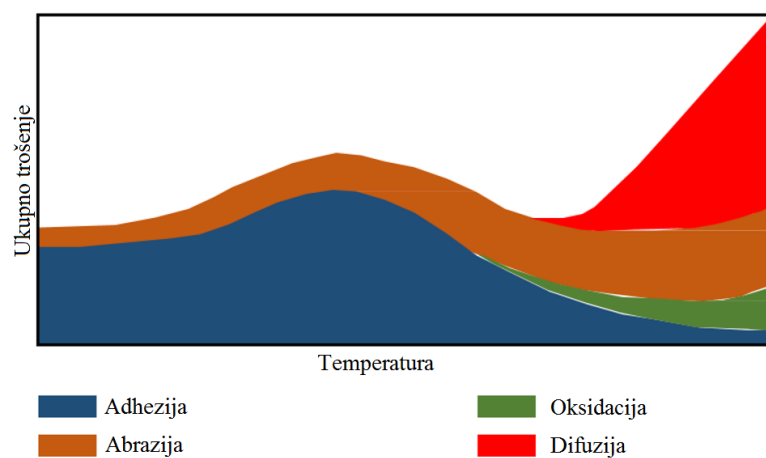


Slika 6. Parametri trošenja oštrice reznog alata [19]

Stražnja površina svrdla neravnomjerno se troši, pri čemu je na obodnom dijelu trošenje najveće, a u blizini poprečne oštrice najmanje. Najviše se troše kutovi i rub svrdla, jer su brzine na tim mjestima najveće [14].

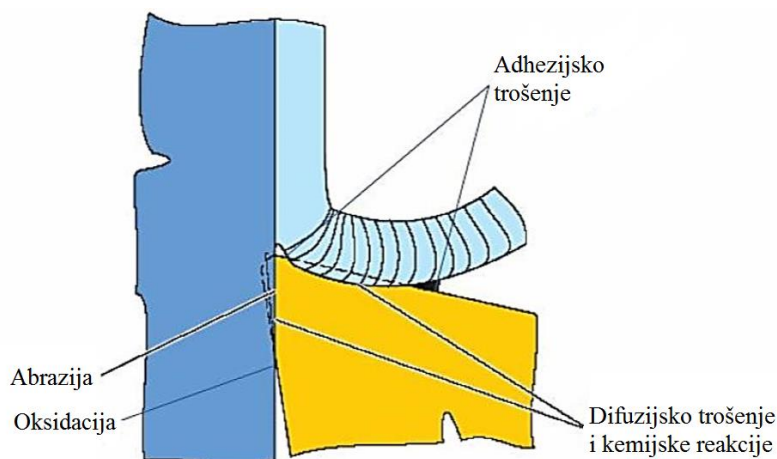
3.2. Mehanizmi trošenja

U literaturnim navodima, najčešće spominjani procesi trošenja su adhezija, abrazija, oksidacija, difuzija, plastična deformacija rezne oštrice i trošenje uslijed umora materijala. Slika 7 prikazuje udjele nekih procesa trošenja, te kvalitativno ukupan iznos trošenja [18].



Slika 7. Udjeli procesa trošenja u ukupnom trošenju [18]

Slika 8 prikazuje mehanizme trošenja na alatu, a vidljivo je da se na pojedinim površinama javljaju različiti procesi trošenja. Tijekom bušenja, najčešće su prisutna sva četiri mehanizma trošenja navedena na slikama 7 i 8 [12].



Slika 8. Mehanizmi trošenja na alatu tijekom obrade [12]

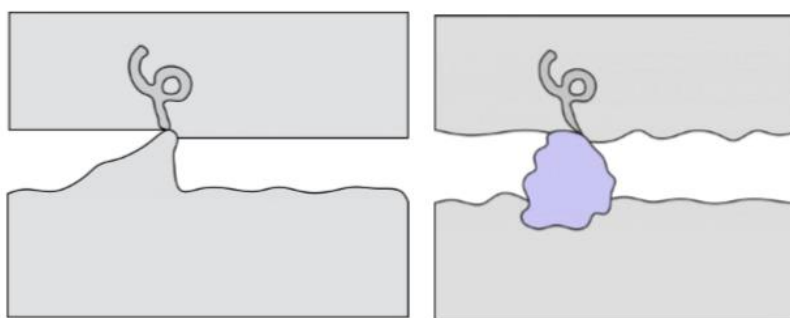
3.2.1. Abrazijsko trošenje

Abrazijsko trošenje predstavlja karakterističan proces trošenja, koji je uvijek prisutan kod procesa obrade odvajanjem čestica. Nastaje pri kontaktu alata i obratka, najčešće utjecajem različitih uključina unutar materijala obratka [20].

Ovisno o strukturi tribosustava abrazijsko trošenje dijeli se prema [21] na:

- abrazijsko trošenje u dodiru dva tijela [Slika 9], lijevo – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazivno protutijelo),
- abrazijsko trošenje u dodiru tri tijela [Slika 9], desno – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela, te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

Intenzivnije djelovanje abrazijske nastaje zbog nedovoljnog podmazivanja između površina alata i obratka, neodgovarajućeg medija za podmazivanje ili neadekvatne hrapavosti površina, što može biti posljedica drugih mehanizama trošenja. Međutijelo pri abrazijskom trošenju između tri tijela uzrokuje nastajanje malih ogrebotina u smjeru glavnog gibanja [20].



Slika 9. Podjela abrazijskog trošenja ovisno o strukturi tribosustava [5]

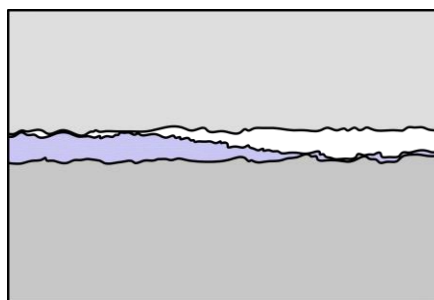
Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva/materijal moguća su tri slučaja [21]:

- čista abrazija – konstantan i ujednačen gubitak materijala abradiranog tijela duž površine,
- selektivna abrazija – mjestimičan gubitak materijala abradiranog tijela duž površine,
- nulta abrazija – abradirano tijelo je veće čvrstoće od protutijela i nema gubitka materijala.

3.2.2. Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje [Slika 10] nastaje odmah nakon procesa rezanja, uglavnom pri nižim temperaturama, mehaničkim lijepljenjem, odnosno zavarivanjem malih komada netom prije odvojenih čestica, tvoreći tako naljepak na reznoj oštrici. Nakon kratkog perioda, dolazi do kidanja naljepka, a tako i mogućeg otkidanja dijela rezne oštrice. Adhezija raste s porastom tlaka između oštrice i odvojene čestice, a mogućnost nastanka naljepka raste s porastom hrapavosti površine [20].

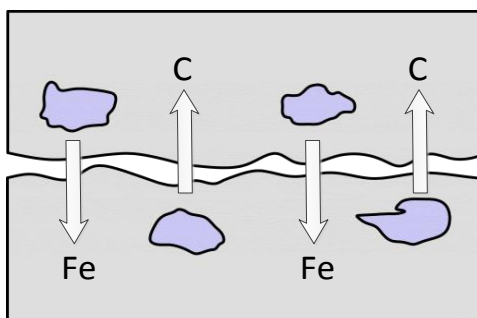
Kod postupka bušenja, stvaranje naljepka ne može se spriječiti neovisno o materijalu obratka [5].



Slika 10. Adhezijsko trošenje [5]

3.2.3. Difuzijsko trošenje

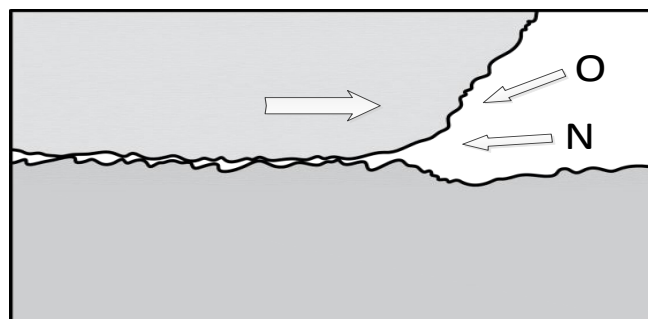
Prilikom porasta brzine rezanja postižu se znatno više temperature tijekom obrade. Porast temperature, uzrokuje trošenja temeljena na mehaničkim i kemijskim djelovanjima. Difuzija predstavlja toplinski aktiviran efekt, a uzorkovana je kemijskim opterećenjima koja rastu s porastom temperature, te afinitetom materijala alata prema materijalu obratka. Difuzijsko trošenje [Slika 11] je glavni čimbenik nastanka kraterskog trošenja, a može se smanjiti primjenom odgovarajućih prevlaka [20].



Slika 11. Difuzijsko trošenje [5]

3.2.4. Oksidacijsko trošenje

Oksidacijsko trošenje [Slika 12] uzrokovano je kemijskim promjenama unutar materijala alata, pri povišenim temperaturama uz prisutnost zraka. Najčešća mjesta na kojima nastaje oksidacija su početak i kraj dijela oštrice koja je u zahvatu s obratkom. Problem pojave oksidacije, reducira se pravilnim odabirom alata, upotrebom raznovrsnih prevlaka ili upotrebom alata od tvrdog metala građenih s određenim vezivom [20].



Slika 12. Oksidacijsko trošenje [5]

3.2.5. *Plastična deformacija rezne oštrice*

Prilikom postupka bušenja i uslijed povišene temperature, uz istovremeno djelovanje tlačnih napreznja na reznu oštricu alata, može doći do pojave plastičnih deformacija i značajne promjene geometrijskih kutova svrdla. Plastična deformacija javlja se pri temperaturu od oko 900°C i više, a do nje dolazi zbog adhezijskog trošenja između odvojene čestice i rezne oštrice alata. Najčešće se javlja kod alata izrađenog od tvrdog metala, ali može se pojaviti i kod alata izrađenog od polikristalnog dijamanta i keramike. Na navedeni proces trošenja može se utjecati pravilnim odabirom geometrije i vrstom materijala reznog alata [20].

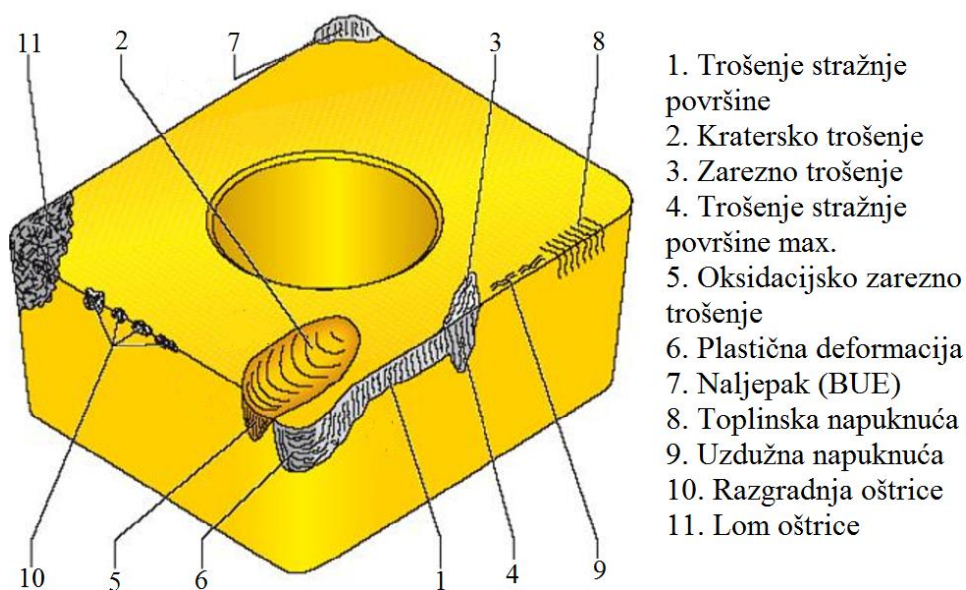
3.2.6. *Umor površine*

Na samome ulasku alata u zahvat s obratkom, opterećenje na reznu oštricu naglo raste, a time raste temperatura u zoni kontakta i takvo stanje traje sve dok oštrica ne izađe iz zahvata. Proces se periodički ponavlja za svaku oštricu, u visokoj frekvenciji, što dovodi do navedenog oblika trošenja. Ako se pojavi više manjih pukotina na prednjoj površini alata, dolazi do razaranja iste što može uzrokovati krhanje, ili u najgorem slučaju lom oštrice. Posebna se pozornost prilaže odabiru materijala visoke tvrdoće, čvrstoće i žilavosti na povišenim temperaturama, kako bi se ovaj oblik trošenja izbjegao [20].

Pri bušenju kamena, umor površine predstavlja velik problem, jer se prilikom obrade mogu pojaviti mikropukotine, koje se s vremenom eksploatacije šire i postepeno pune sitnim česticama kamena. Prilikom porasta temperature, čestice se šire te na oštricu djeluju kao klin koji razdvaja oštricu te tako uzrokuje krzanje ili lom rezne oštrice [5].

3.3. **Oblici trošenja**

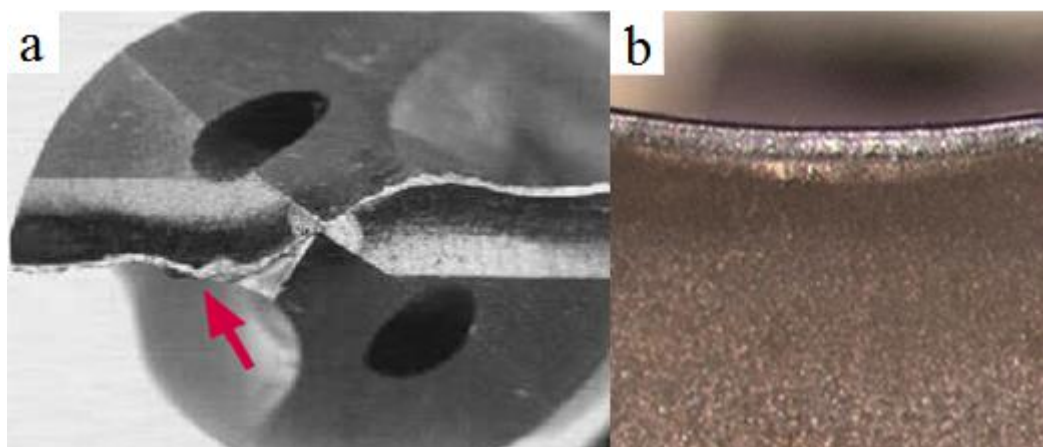
Slika 13 prikazuje najčešće oblike trošenja i uobičajene položaje njihovih pojava na reznom alatu. Alat je često izložen različitim uvjetima, odnosno opterećenjima koji uzrokuju pojavu različitih mehanizama trošenja. Uz mehanizme trošenja, dolazi do pojave i različitih oblika trošenja [18].



Slika 13. Najčešći oblici trošenja i uobičajeni položaji njihove pojave [19]

3.3.1. Trošenje stražnje površine glavne rezne oštrice

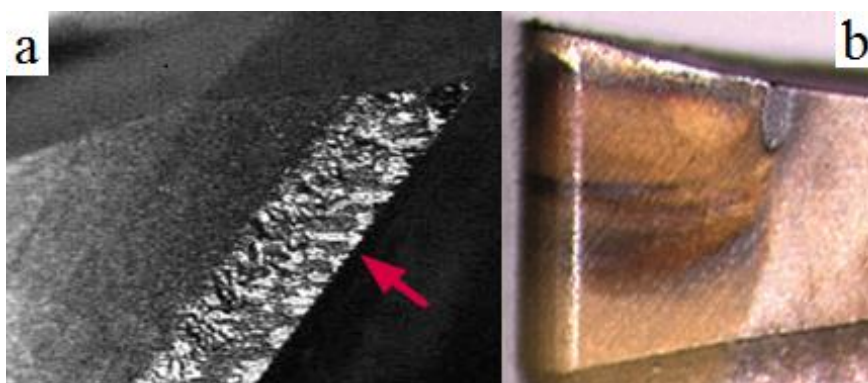
Uzrok pojave ovog oblika trošenja [Slika 14] su: prevelika brzina obrade, nedovoljna otpornost na trošenje, premali posmak i nedovoljno korištenje SHIP-a. Trošenje stražnje površine glavne rezne oštrice reducira se: smanjenjem brzine obrade, odabirom alata otpornijeg na trošenje, povećanjem posmaka i učinka SHIP-a [12], [18].



Slika 14. Trošenje stražnje površine glavne rezne oštrice a) prema [22], b) prema [23]

3.3.4. Zarezno trošenje

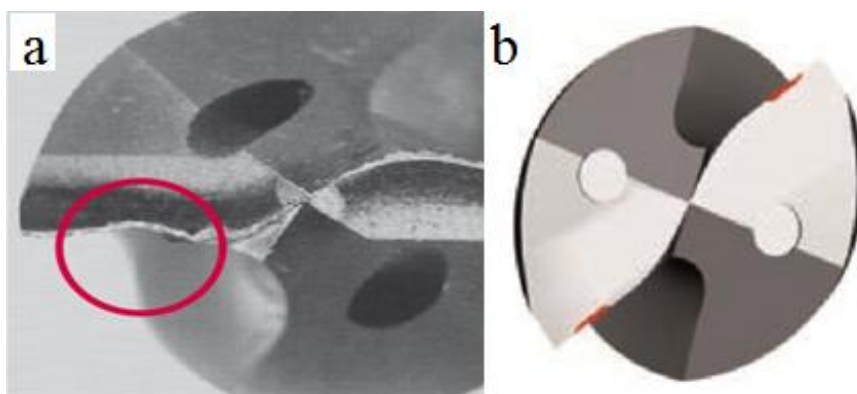
Ovaj oblik trošenja [Slika 17] uzrokuje prevelika brzina obrade ili nedovoljna otpornost na trošenje. Preporuka za smanjenje ovog oblika trošenja je odabir alata otpornijeg na trošenje ili smanjenje brzine obrade [18].



Slika 17. Zarezno trošenje a) prema [22], b) prema [23]

3.3.5. Lom na glavnoj reznoj oštrici

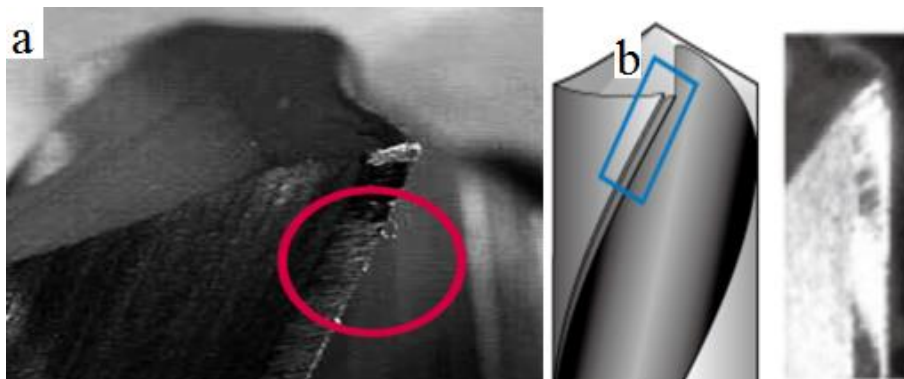
Ovaj oblik trošenja [Slika 18] javlja se pri proširivanju provrta na veće dimenzije zbog pojave visokih naprezanja u trenutku dodira svrdla i provrta, ali i postizanja maksimalno dopuštenog iznosa trošenja stražnje površine glavne rezne oštrice. Uz porast istrošenosti veže se i porast sile, pa tako i naprezanja, a u slučaju da naprezanje premaši lomnu čvrstoću materijala, dolazi do loma. Predložena rješenja za smanjenje ovog oblika trošenja su korištenje svrdla s izmjenjivim pločicama, ranija zamjena svrdla ili korištenje svrdla koje je izrađeno od žilavijeg materijala [12].



Slika 18. Lom na glavnoj reznoj oštrici a) prema [22], b) prema [24]

3.3.8. Trošenje fazete svrdla

Ovaj oblik trošenja [Slika 21] nastaje uslijed dovođenja neodgovarajuće količine sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, prevelike brzine rezanja ili obrade izrazito abrazivnog materijala. Preporuka za smanjenje pojave ovog oblika trošenja je korištenje čistog ulja ili emulzije s većim udjelom ulja kao sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje, smanjenje brzine rezanja i korištenje alata izrađenog od tvrdih materijala [12].



Slika 21. Trošenje fazete svrdla a) prema [22], b) prema [26]

3.3.9. Lom svrdla

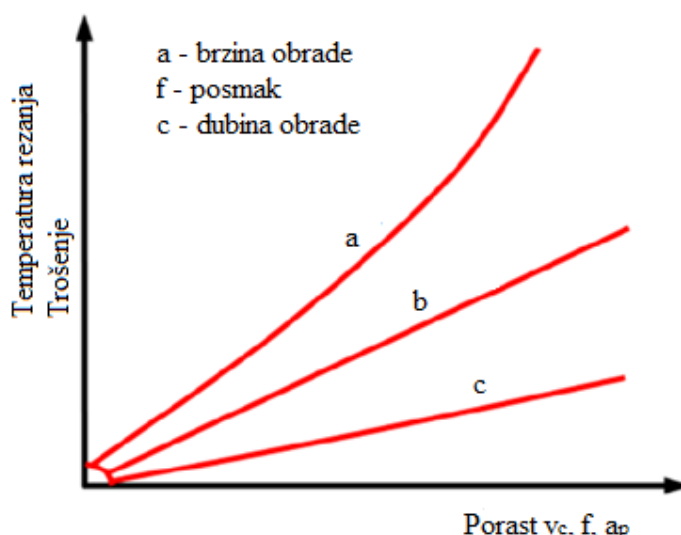
Izrazito nepoželjan oblik trošenja [Slika 22] koji može izazvati oštećenja na stroju i na obratku. Nastaje uslijed obrade s neodgovarajućim svrdlom, nedovoljne snage glavnog vretena, zaglavljivanja odvojene čestice, prevelikog posmaka i prekomjernog trošenja. Za smanjenje ili eliminaciju ovog oblika trošenja potrebno je izabrati odgovarajuće svrdlo, smanjiti posmak i provjeravati intenzitet trošenja svrdla [12].



Slika 22. Lom svrdla [22]

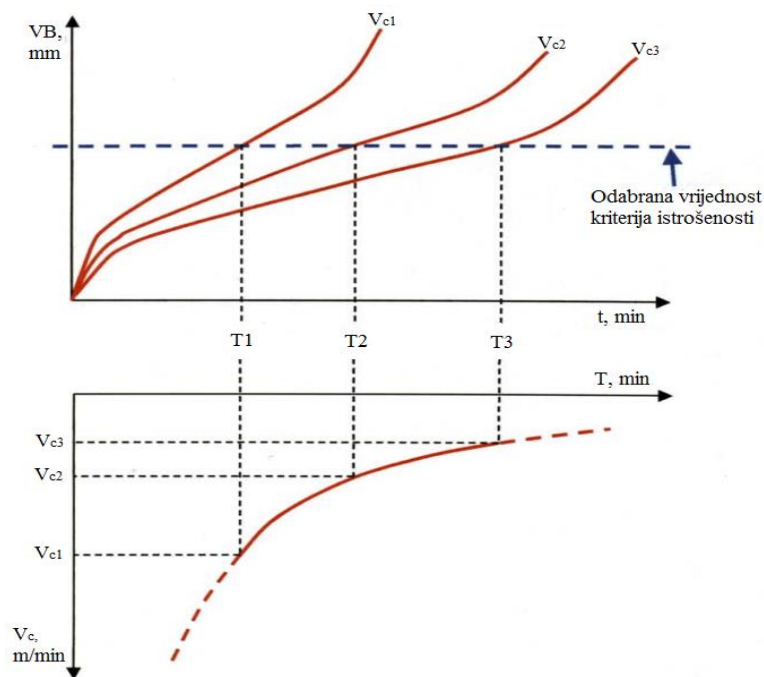
3.4. Postojanost oštrice reznog alata

Danas se pri proizvodnji reznih alata veliki naglasak stavlja na poboljšanje produljenja vijeka trajanja pri različitim vrstama obrade i materijalima. Prijevremena zamjena ili lom alat, dovodi do povećanja troškova proizvodnje. Alat koji više ne može obavljati zahtijevanu funkciju dosegao je korisni vijek trajanja. Kao kriterij postojanosti, može se uzeti duljina puta u smjeru glavnog ili posmičnog gibanja, vrijeme zahvata alata i obratka, vrijednost parametara obratka (hrapavost i dimenzije) i mjerljivih veličina (sile, snage, momenta, vibracije). Za različite materijale alata, preporučuju se različiti kriteriji istrošenosti. Na slici 23 prikazan je utjecaj parametara obrade na iznos trošenja i temperaturu rezanja. Najveći utjecaj na iznos trošenja ima brzina rezanja, zatim posmak, a najmanji utjecaj ima dubina obrade [19].



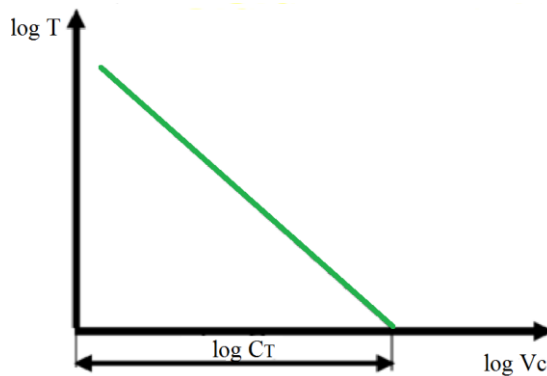
Slika 23. Utjecaj parametara obrade na iznos trošenja i temperaturu rezanja [16]

Trošenje stražnje površine alata često se koristi kao kriterij za određivanje vijeka trajanja alata zbog utjecaja na hrapavost obrađene površine i dimenzijsku točnost izratka. Slika 24 prikazuje krivulje trošenja za tri različite brzine rezanja, brzina rezanja 1 je najveća (gore) i ovisnost vijeka trajanja alata o brzini rezanja (dolje). Što je brzina rezanja veća, to je vijek trajanja alata kraći [19].



Slika 24. Krivulje trošenja i ovisnost vijeka trajanja alata o brzini rezanja [19]

Taylor je linearnu ovisnost vijeka trajanja alata o brzini rezanja [Slika 25], matematički zapisao prema jednadžbi (4.1) iz [16]:



Slika 25. Grafički prikaz Taylorove jednadžbe [16]

$$v_c \cdot T^m = C_T. \quad (4.1)$$

Konstantna C_T ima fizikalni smisao brzine rezanja pri kojoj postojanost alata iznosi jednu minutu, odnosno jednu vremensku jedinicu, a m je eksponent Taylorove jednadžbe [16].

Prošireni oblik Taylorove jednadžbe (4.2), uz eksponente ovisne o uvjetima obrade x , y , z , prema [16] je:

$$v_c = C^T \cdot a_p^x \cdot f^y \cdot T^z. \quad (4.2)$$

Postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja tipična je za postupak bušenja. Duljina puta L_f u smjeru posmičnog gibanja definirana je kao umnožak posmične brzine v_f i vremena postojanosti oštrice alata T prema jednadžbi (4.3) iz [16]:

$$L_f = v_f \cdot T. \quad (4.3)$$

Iz jednadžbe (4.3) slijedi izraz za postojanost oštrice alata (4.6):

$$T = L_f \cdot \frac{D \cdot \pi}{v_c \cdot f}. \quad (4.6)$$

Nakon sređivanja (4.6), dobivaju se jednadžbe (4.7), (4.8) i (4.9):

$$v_c \cdot \left(L_f \cdot \frac{D \cdot \pi}{v_c \cdot f} \right)^m = C_T, \quad (4.7)$$

$$v_c^{1-m} \cdot L_f^m = C_T \cdot \left(\frac{f}{D \cdot \pi} \right)^m, \quad (4.8)$$

$$C_T^{\frac{1}{1-m}} \cdot \left(\frac{f}{D \cdot \pi} \right)^{\frac{m}{1-m}} = C_{L_f}. \quad (4.9)$$

Uz $\frac{m}{1-m} = m_f$ (m_f je Taylor-ov eksponent) dobiva se konstantna brzine rezanja (4.10) iz [16]:

$$v_c \cdot L_f^{m_f} = C_{L_f}. \quad (4.10)$$

4. SREDSTVO ZA HLAĐENJE, ISPIRANJE I PODMAZIVANJE (SHIP)

Mehanički, toplinski i kemijski utjecaji dovode do trošenja alata. Intenzitet prisutnih utjecaja bitno se može smanjiti korištenjem sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Svrha uporabe (učinci) ili tehnološke funkcije SHIP-a su prema [27]:

- podmazivanje površine alata na kojima se razvija trenje,
- hlađenje alata i obratka, čime se sprečava povećanje temperature i usporava proces trošenja alata (ili omogućuje obrada većim brzinama),
- odvođenje (ispiranje) odvojenih čestica i prašine s alata i obratka, čime se smanjuje trošenje alata i poboljšava kvaliteta obrađene površine,
- smanjuje sile rezanja,
- kemijska zaštita obrađene površine od štetnog djelovanja okoline (zbog toga SHIP treba imati antikorozijska svojstva).

4.1. Vrste SHIP-a

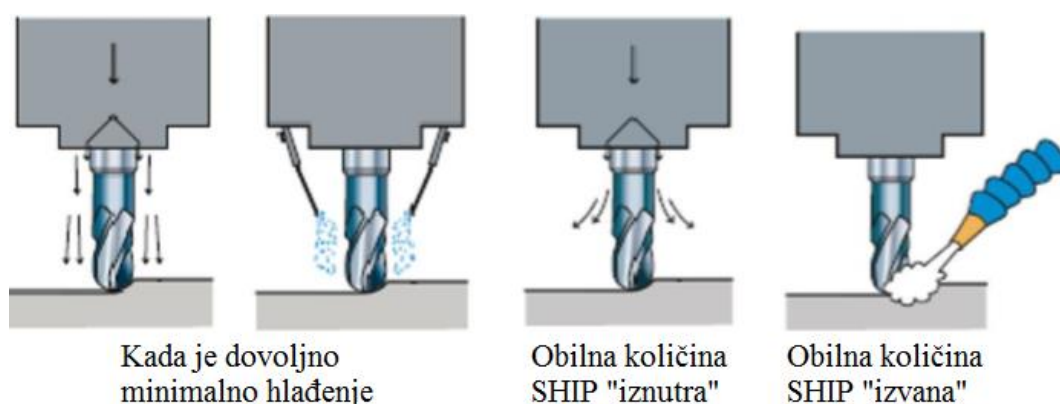
Vodne emulzije predstavnik su skupine SHIP-a, koje ima primarno svojstvo hlađenja, a sekundarno (samo djelomično) podmazivanja. Mineralna, biljna, životinjska ulja i petrolej predstavnici su skupine SHIP-a, koje ima primarno svojstvo podmazivanja, a sekundarno (samo djelomično) hlađenja. U organiziranim sredinama, odvojena čestica se prije deponiranja, a u cilju reciklaže, mora isprati, a SHIP se mora na odgovarajući način zbrinuti (biorazgradivost) [27].

Funkcija hlađenja bitna je kod postupaka obrade odvajanjem čestica. Smanjenjem trenja, dolazi i do smanjenja uložene snage koja se pretvara u toplinu, pa je manje zagrijavanje obratka. Utjecaj na izbor SHIP-a imaju funkcije: odvođenje odvojene čestice, zaštita površine obratka, utjecaj na radnika, zaštita stroja, otpornost na starenje, razgradivost itd. Najčešća vrsta SHIP-a koja se primjenjuje u proizvodnji je u obliku tekućina, a može se podijeliti na SHIP koji se miješa s vodom i na SHIP koji se ne miješa s vodom. Po pitanju plinova najviše se koriste komprimirani zrak, a kod kriogene obrade dušik i ugljikov dioksid za uspješno odvođenje odvojenih čestica [12].

4.2. Način dovođenja SHIP-a

Hlađenje treba uvijek biti ravnomjerno i treba početi prije prvog kontakta alata i obratka. SHIP se dovodi [Slika 26] na pravu lokaciju prema [27] putem:

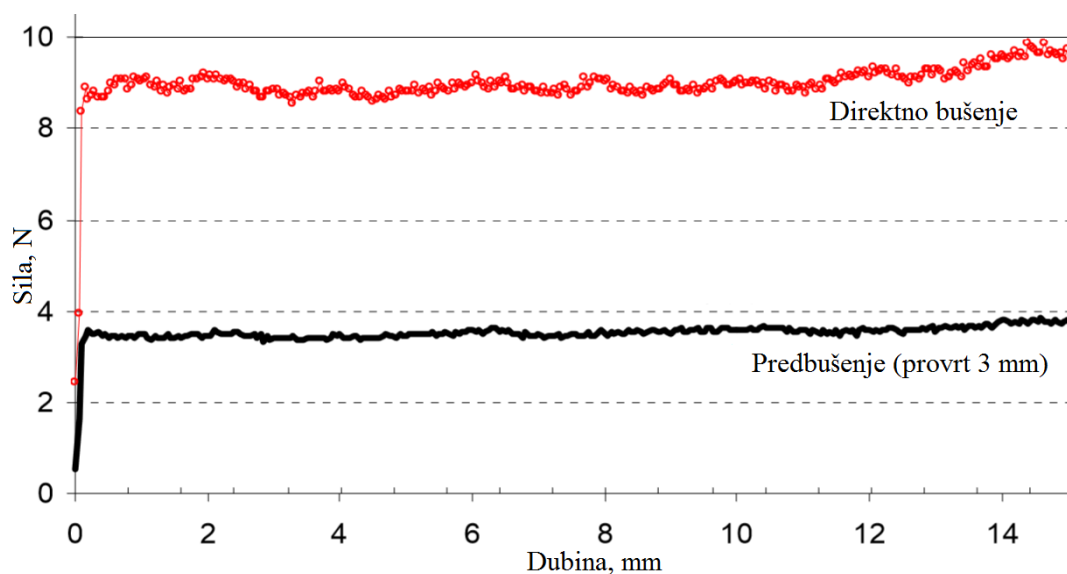
- slobodnog mlaza,
- niskog tlaka,
- visokog tlaka (zahtjeva zaštitu radnog prostora),
- struje stlačenog zraka (sve češće).



Slika 26. Primjer dovođenja i primjena SHIP-a [27]

4.3. Utjecaj SHIP-a na odvojenu česticu kod bušenja kamena

U radu [28] su provedena ispitivanja svrdlom promjera 5 mm, koje ima dvije glavne (većinski obavljaju proces rezanja) i dvije poprečne (dolaze do izražaja prilikom vibracija ili titranja svrdla) rezne oštrice. Središnji dio svrdla, koji se nalazi između glavnih reznih oštrica (glavne rezne oštrice ne sastaju se u vrhu svrdla), ne obavlja rezanje, već služi za hladnu deformaciju odvojene čestice koju izbacuje s vrha svrdla i gura kroz svrdlo van zone rezanja. Posljedica ovakve izvedbe vrha svrdla je opasnost od nepravilnog pozicioniranja, te vibracije i pojačano trošenje svrdla za vrijeme bušenja (posebno na početku). Problem je riješen predbušenjem provrta promjera 3 mm, čime su smanjeni otpor rezanja, vibracije i trošenje. Postupak omogućava primjenu komprimiranog zraka u ulozi SHIP-a, pri čemu dolazi do smanjenja trošenja svrdla i smanjene otpornosti koju pružaju čestice prašine, nastale bušenjem kamena. Slika 27 i tablica 3 prikazuju sile u slučaju predbušenja i bez predbušenja u funkciji dubine bušenja [28].



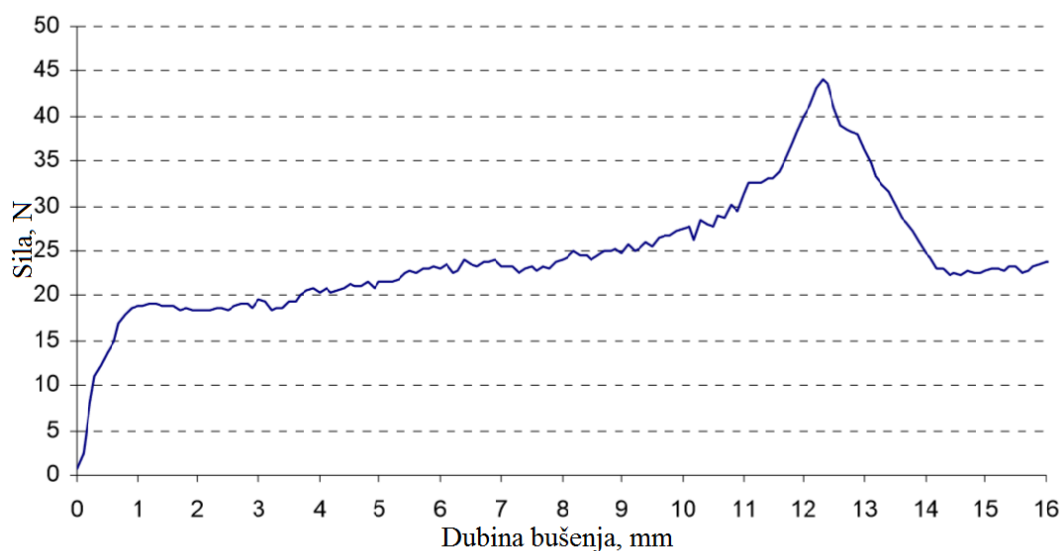
Slika 27. Ovisnost sile o dubini bušenja – sa i bez predbušenja [28]

Vidljivo je značajno smanjenje sile u slučaju predbušenja prilikom ulaska svrdla u zahvat s obratkom, a manji je i porast aksijalne sile tijekom bušenja. Zbog raznovrsnih izvedba vrha svrdla, ne dolazi uvijek i u isto vrijeme do porasta sile na početku bušenja. Tako se zaključuje da će razni intenziteti bušenja i razne vrste kamena imati utjecaj na silu [28].

Tablica 3. Odnos sile bušenja – sa i bez predbušenja [28]

Ispitivanje na dubinu 1-10 mm	Direktno bušenje	Predbušenje provrta 3 mm
Prosječna sila	8,7 N	3,5 N
Iznos maksimalne i minimalne sile	9,5 / 8,1 N	3,7 / 3,3 N

U slučaju predbušenja olakšano je hlađenje oštrica uporabom komprimiranog zraka koji smanjuje trošenje svrdla. Zbog nastanka čvrstih nakupina kamene prašine na dubini od 12 milimetara, primijenjeno je upuhivanje komprimiranog zraka i utjecaj na silu je prikazan na slici 28. Vidi se značajan pad sile, jer je prašina ispuhana izvan zone obrade i ne predstavlja otpor svrdlu. Iz navedenog, može se zaključiti da uporabom komprimiranog zraka dolazi do smanjenja otpornosti na većim dubinama bušenja. Uspjeh metode, ovisi o mogućnosti predbušenja, koji ne bi smjeli unijeti nove parametre nesigurnosti, te su stoga potrebna posebna svrdla, određene geometrije kako bi se ispitivanje moglo vršiti za svaku vrstu kamena i na bilo koji način [28].



Slika 28. Utjecaj komprimiranog zraka na dubini bušenja od 12 milimetara [28]

Ispitivanje prema [29] usmjereno je povećanju učinkovitosti kod bušenja mramora. Kao sredstvo za SHIP, korišten je polietilen glikol topiv u vodi. Praćeni parametri su sila, moment i brzina rezanja, te utjecaj istih na vrh svrdla. Navodi se kako je proces loma kamena prilikom postupka bušenja uzrokovan okomitom silom i horizontalnim silama zakretanja. Poboljšanja na području bušenja i rezanja kamena mogla bi pozitivno utjecati na ekonomičnost rudarenja i postupke prerade kamena. U ranijim istraživanjima najčešće korišteni SHIP je obična voda. Bitni parametri za korištenje SHIP-a prilikom uporabe tekućih medija su tlak, volumen i brzina. Svojstva SHIP-a prema [29] su:

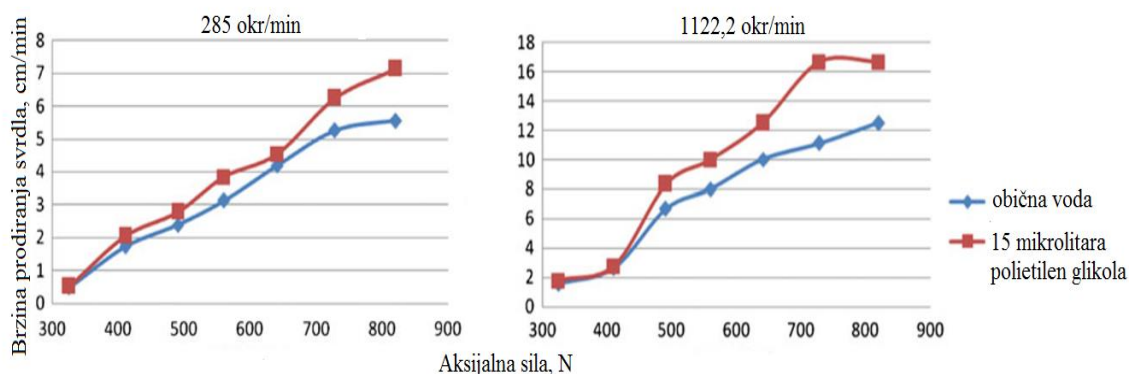
- hladiti vrh svrdla,
- očistiti vrh oštrice od blata i prašine,
- ispirati blato i prašinu s rubova provrta,
- podmazivanje na dodirnim površinama alata i kamena,
- stabilizacija bušilice zbog smanjenja vibracija.

Povećanje topline uslijed trenja tijekom bušenja kamena nije eliminirano uporabom obične vode. Ranije se zaključilo da se na proces širenja pukotina u kamenu može utjecati kemijskom adsorpcijom površine kamena koji se buši, smanjenjem energije površine. Polietilen glikol je skup, ali korišten u mikro dozama nema štetnih utjecaja na kvalitetu vode, niti na kamen. Jednom pomiješan i otopljen u vodi, polietilen glikol ostaje održiv [29].

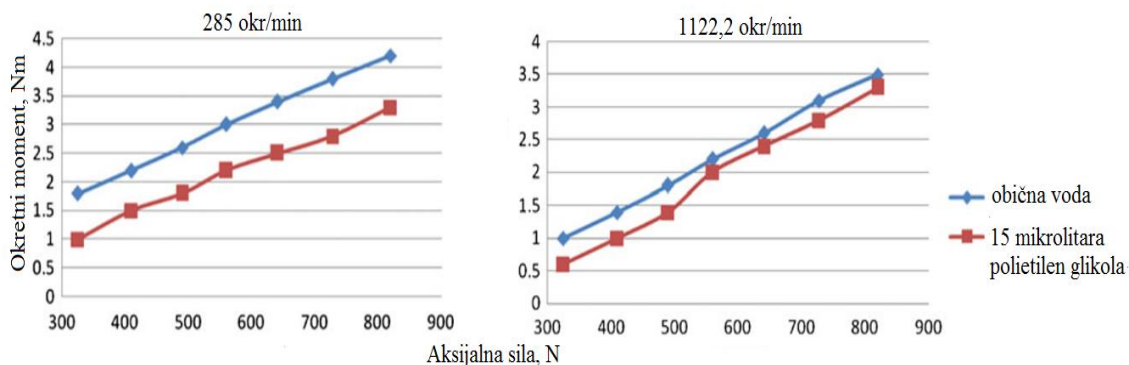
Učinak bušenja uglavnom ovisi o [29]:

- fizičko – mehaničkim svojstvima kamena,
- obliku alata za bušenje,
- veličini sila bušenja koje djeluju u dodiru alata i obrađivanog materijala,
- mjeri ispiranja.

Tijekom eksperimenta bitno je znati utjecaj sile, brzine rezanja, učestalosti vrtnje i koncentracije polietilen glikola u vodi na brzinu prodiranja vrha svrdla u materijal. Dodatak polietilen glikola u vodu, povećao je posmičnu brzinu rezanja [Slika 29] i smanjio je okretni moment [Slika 30] u odnosu na običnu vodu kao SHIP. Istraživanja su pokazala da ima smisla povećavati aksijalnu silu do određene vrijednosti, jer se daljnjim povećanjem ne postiže i veća brzina prodiranja. Svaka brzina rezanja pokazuje drugačiju graničnu vrijednost posmične brzine i okretnog momenta. Razvijeni moment je 1,5 puta manji u slučaju primjene SHIP-a s polietilen glikolom, a do smanjenja je došlo zbog smanjenja otpora i trenja [29].

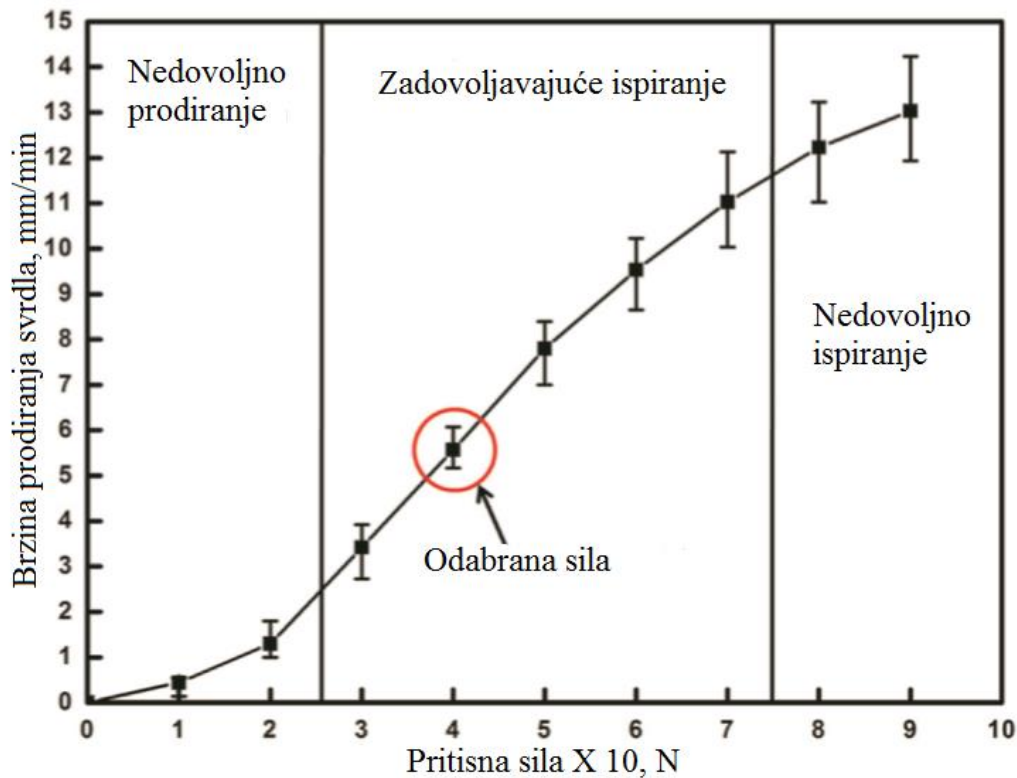


Slika 29. Medusobni utjecaj brzine rezanja, sile i učestalosti vrtnje [29]



Slika 30. Medusobni utjecaj momenta, sile i učestalosti vrtnje [29]

Prema istraživanju [30], bitno je težiti povećanju brzine rezanja i kemijskoj pripremi SHIP-a kod postupka bušenja kamena. Ranije je zaključeno da se djelovanjem na kemijski sastav okoline može utjecati na tvrdoću kamena. Istraživanja su pokazala kako se pri $F=40$ [N], $S=300$ [°/min] i $q_t=0.6$ [l/min] i korištenju obične vode kao SHIP-a postiže potpuno ispiranje čestica kamena. Vrijednost brzine rezanja pri tim parametrima uzeta je kao referentna, kako bi se usporedila s idućim kemijskim modificiranim sredstvima za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Prema ranijim istraživanjima i na slici 31 pokazano je kako navedeni parametri osiguravaju zadovoljavajuće ispiranje odvojene čestice kamena. Uporabom mikro doza kemijskih spojeva u vodu i raspršivanjem po površini kamena, koji je ranije pobrušen, smanjena je tvrdoća blizu površine kamena, te je znatno smanjena napetost površine, a povećana je brzina rezanja. Takvi spojevi osiguravaju odličnu pokrivenost površine kamena uz korištenje vrlo malih dodataka kemijskih spojeva. Potrebno je osigurati da SHIP dobro popunjava prostor ispred svrdla, jer razvojem pukotina, popunjava te pukotine i osigurava ne direktan dodir svrdla i kamena. Tekućina osigurava hidraulički tlak, koji potpomaže pri bušenju kamena. Uz sve navedeno, bitan je i oblik vrha svrdla koji se koristi za bušenje [30].



Slika 31. Prikaz sile u ovisnosti o području ispiranja [30]

5. NADZOR ISTROŠENOSTI OŠTRICE ALATA

Funkcija nadzornog sustava je brza i precizna identifikacija stanja stroja, alata i/ili obratka u cilju postizanja visokog stupnja autonomnosti, pouzdanosti, robusnosti, fleksibilnosti i produktivnosti obradnih strojeva. Od sustava nadzora očekuje se da osigura izradu što konkurentnijeg, tj. jeftinijeg i kvalitetnijeg proizvoda i da poveća sigurnost obradnog procesa. Implementacija i razvoj sustava nadzora predstavlja jedan od nužnih elemenata u razvoju adaptivnih CNC sustava upravljanja, koji predstavljaju sljedeći korak u automatizaciji obradnih strojeva. Današnji se razvoj nadzora istrošenosti zasniva na modularnoj platformi koju je moguće u potpunosti integrirati s upravljačkim sustavom stroja, većem broju parametara nadzora i sve kvalitetnijoj elektronici [31].

5.1. Sustav nadzora obradnog procesa

Procjena stanja istrošenosti alata i detektiranje loma smatraju se najbitnijim problemom u modernoj automatizaciji CNC strojeva. Primjena pouzdanog sustava za praćenje nadzora istrošenosti alata, omogućila bi da se podaci o stanju trošenja alata šalju CNC upravljačkom sustavu u svrhu adaptiranja posmične i glavne brzine rezanja [32].

Viša razina automatizacije alatnih strojeva nudi nekoliko važnih prednosti prema [32]:

- spriječili bi se zastoji u radu prouzrokovani lomom alata i potencijalne posljedične štete na stroju,
- izbjegla bi se prijevremena zamjena ili prekomjerna upotreba alata,
- smanjio bi se broj nesukladnih jedinica i jedinica koje bi morale na doradu,
- sustav nadzora alata neophodan je u proizvodnji bez čovjeka i fleksibilnoj automatiziranoj proizvodnji,
- postojala bi mogućnost optimizacije procesa obrade.

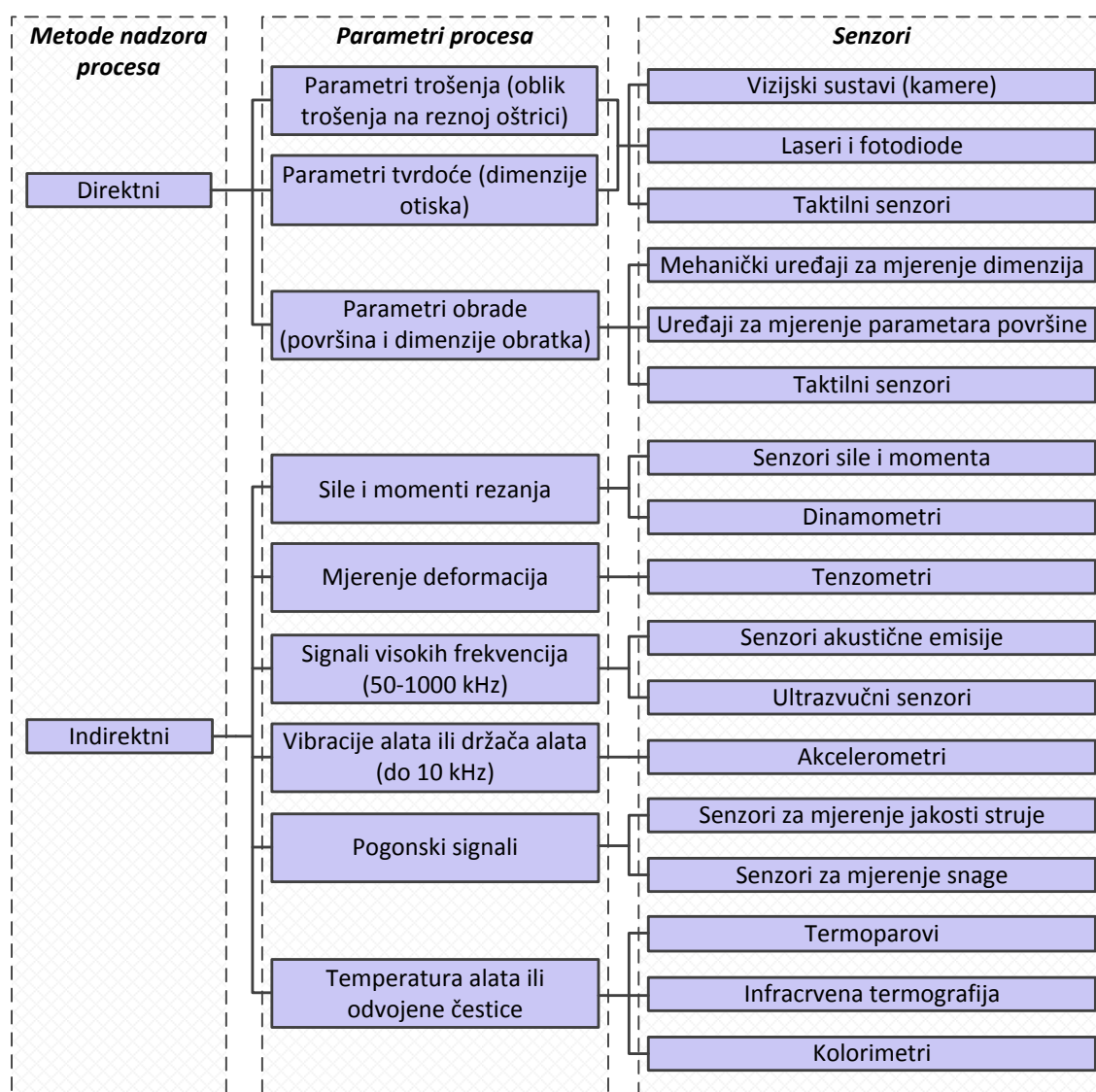
Sustave za mjerenje utjecajnih veličina procesa trošenja moguće je podijeliti prema [33] nekoliko kriterija:

- prema načinu prikupljanja podataka: direktni i indirektni,
- prema broju različitih mjernih sustava: jednosenzorski i višesenzorski mjerni sustavi,
- prema smještaju senzora, odnosno integracije s obradnim strojem: interni i eksterni.

Interni mjerni sustavi odnose se na primjenu senzora koji su prisutni u obradnom stroju, kao dijelovi mjernog dijela upravljačkog sustava, uz pretpostavku da je upravljački sustav izveden u otvorenoj arhitekturi. Primjenom internih mjernih sustava osjetljivih na promjene u geometriji rezne oštrice alata, izbjegava se ugradnja dodatne mjerne opreme u stroj, čime se uz smanjene troškova postiže visok stupanj fleksibilnosti. Takvi signali neizbježno sadrže poremećaje koje može biti teško identificirati i izdvojiti iz signala, a posljedica su djelovanja trenja, praznog hoda i inercijskih sila uzrokovanih ubrzanjem motora. Najčešće razmatrani signali internih mjernih sustava odnose se na senzore jakosti struja prisutne u regulatorima glavnih i posmičnih motora [33].

Eksterni mjerni sustavi koriste vanjske senzore koji se ugrađuju na postojeću konstrukciju stroja, a mogu se koristiti zasebno ili u sklopu upravljačkog sustava stroja. Najčešće se primjenjuju senzori sila ili momenta (ugradnja u sklopu stezne naprave), te senzori vibracija ili akustične emisije (ugradnja u neposrednoj blizini alata ili obratka). Primjenom eksternih mjernih sustava omogućeno je izravnije mjerenje veličina procesa trošenja, jer je u odnosu na interne sustave smanjeno djelovanje poremećaja ili šuma. Primjena ovakvih sustava povećava složenost [33].

Prema ranije navedenom kriteriju smještanja senzora na slici 32 prikazani su pristupi nadzoru istrošenosti reznog alata i tvrdoće obratka [5].

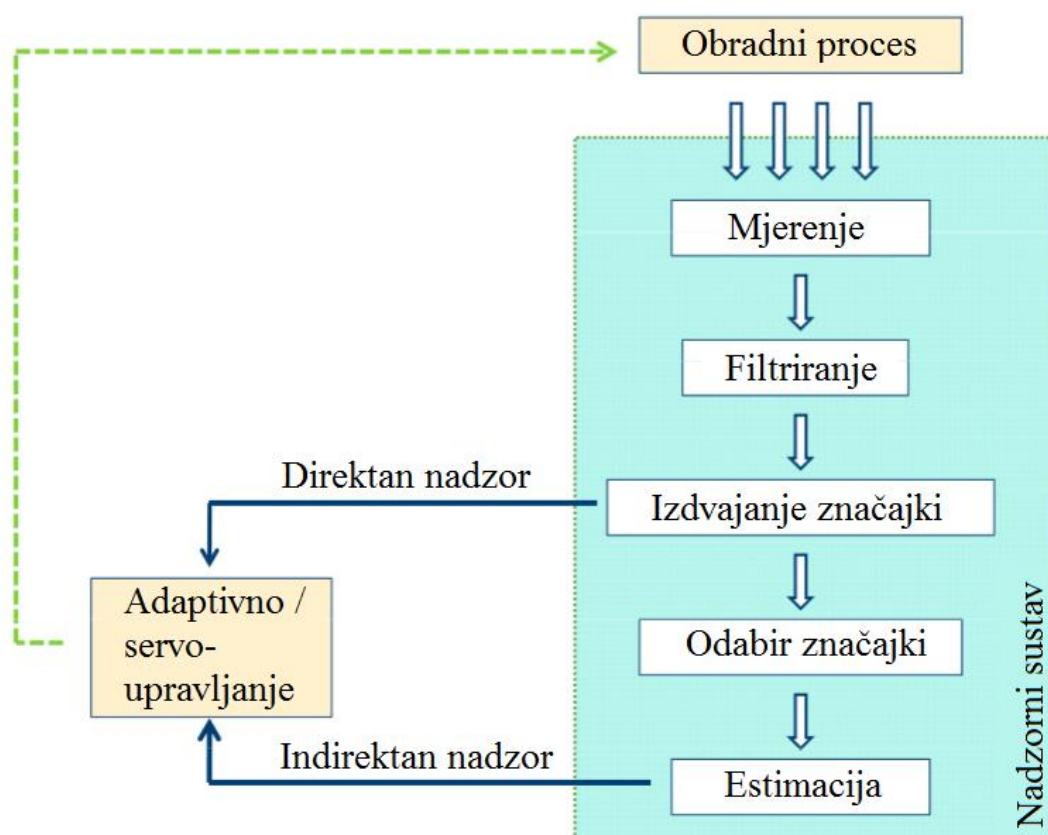


Slika 32. Pristupi nadzoru istrošenosti reznog alata i tvrdoće obratka [5]

Direktnim je pristupom omogućeno izravno i precizno određivanje stanja oštice alata. Ove se metode ujedno nazivaju i off-line metodama, jer je njihova primjena moguća u trenucima kada alat nije u zahvatu, a time se izaziva kašnjenje u procjeni stupnja istrošenosti, što je ujedno i jedan od glavnih nedostataka ovog pristupa. Najčešće primjenjivani direktni pristup zasniva se na mjerenju parametara trošenja primjenom industrijskih kamera i računalnog vida. Direktni nadzor procesa nije pronašao širu primjenu zbog nemogućnosti jednostavne prilagodbe vizijskih sustava specifičnostima stroja i geometriji različitih reznih alata [33].

Indirektne, odnosno on-line metode, s druge strane se oslanjaju na višesenzorski pristup, gdje se tijekom obrade mjere različiti parametri procesa (vibracije, sile, momenti, akustična emisija, jakosti struje motora i dr.) vezani uz trošenje alata [33].

Najvažniji zadatak je razvoj sustava [Slika 33] za nadzor procesa obrade koji bi u realnom vremenu mogao identificirati stanje stroja i alata. Pri tome pouzdano određivanje stupnja istrošenosti alata predstavlja najvažniji segment sveukupnog nadzora. Trošenje alata primarni je generator slučajnih poremećaja s izravnim utjecajem na sigurnost, kvalitetu i ekonomičnost obrade [34].



Slika 33. Elementi sustava nadzora [31]

Funkcije prikazanih modula mogu se općenito podijeliti na [34]:

- snimanje signala primjenom različitih vrsta senzora,
- filtriranje signala i izdvajanje značajki trošenja,
- učenje i donošenje odluka paralelnim procesiranjem informacija.

Parametri sigurnosti i kvalitete obradnog procesa su prema [31]:

- kvaliteta površine,
- istrošenost reznog alata,
- lom alata,
- dimenzijska točnost obratka,
- vibracije,
- temperatura u zoni rezanja,
- temperatura i vibracije u ležajevima glavnog pogona,
- udar alata u obradak i/ili radni stol stroja.

5.2. Mjerenje signala

Danas su najčešće primijenjene metode indirektnog nadzora istrošenosti alata putem višesenzorskog načina mjerenja, a najčešće se koriste senzori sila i momenata, jakosti struja, 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. Preduvjet uspješnog nadzora trošenja reznih alata je primjena različitih vrsta signala i značajki trošenja, te odabir onih značajki koje su ostvarile najveći stupanj korelacije sa stupnjem istrošenosti alata, u razmatranom koraku procjene [34].

Na mjerne sustave postavlja se niz zahtjeva s obzirom na konstrukcijom definirane značajke alata i stroja, te karakteristike obrade. Ugradnja mjernih sustava ne bi smjela utjecati na konstrukcijom definirane karakteristike stroja u smislu smanjenja njegove statičke, odnosno dinamičke krutosti i radnog prostora [31].

Mjerni sustavi bi trebali zadovoljiti kriterije prema [31]:

- 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,
- jednostavnu integraciju u postojeće strukture obradnih strojeva.

5.2.1. Sile rezanja i moment glavnog vretena

Mjerenje istrošenosti rezne oštrice upotrebom signala sila rezanja spada u indirektno metode nadzora stanja alata. Poznato je da se s povećanjem istrošenosti alata povećavaju i sile rezanja, što je posljedica povećanog trenja između alata i obrađivanog materijala. Zbog toga je primjena senzora sila i momenta u svrhu praćenja stanja alata vrlo česta [33].

Povećanjem trošenja raste potreban rad za odvajanje čestice i stoga se isti smatra jednim od parametara istrošenosti alata. Prilikom bušenja preporučuje se mjerenje aksijalne (posmične) sile i momenta glavnog vretena. Kod postupka bušenja glavni je cilj, sa što manje senzora dobiti što veću pouzdanost sustava za nadzor procesa obrade. Aksijalna sila ne pokazuje dovoljnu osjetljivost te je bez kombinacije s momentom glavnog vretena u industrijskim uvjetima neupotrebljiva [5].

Tvrdoća materijala ima značajan utjecaj na varijacije u vijeku trajanja svrdla, uz pretpostavku da tek nekoliko nasumičnih bušenja u tvrdi materijal može značajnije nepovoljno utjecati na vijek trajanja svrdla od velikog broja provrta u materijal manje tvrdoće. Tvrdoća obrađivanog materijala značajno utječe na sile i moment tijekom bušenja [33].

5.2.2. Jakosti struje motora glavnog i posmičnih prigona

Od pogonskih signala najčešće se koriste referentni iznosi struja dobivenih iz strujne petlje regulacijskog kruga motora posmičnih i/ili glavnog pogona stroja, odnosno primjenom HALL-ova senzora [31].

Jakost struje glavnog motora u usporedbi s ukupnim momentom u načelu sadrži slične informacije o dinamici promatranog procesa obrade. Međutim, mjerenje momenta puno je osjetljivije jer se odgovarajući senzor obično smješta u neposrednu blizinu alata (ispod obratka u sklopu stezne neprave), čime se utjecaj dinamike pogonskih elemenata glavnog prigona znatno smanjuje u odnosu na jakost struje glavnog motora. Istovremeno je mjerenje momenta složeniji postupak koji zahtjeva ugradnju vanjskih senzora i pripadajućeg elektroničkog sklopovlja, u odnosu na mjerenje struje, koje je ionako neizbježno prisutno u sklopu upravljačkog sustava pripadajućeg regulatora motora [33].

Trošenje svrdla vrlo dobro korelira s vrijednostima jakosti struja. Pri bušenju svrdlima malih promjera, nema garancije, da jakost struje posmičnih motora daje dobre rezultate [5].

5.2.3. Vibracije

Mjerenje vibracija nailazi na široku primjenu kod praćenja stanja rotirajućih strojnih dijelova. Međutim, zastupljenost ovih mjerenja u području nadzora stanja alata nije osobito velika. To se može povezati s osjetljivošću mjerenja na šum, općenito prisutnog u svim procesima obrade odvajanjem. Prednost pristupu praćenja stanja oštrice mjerenjem vibracija nalazi se u jednostavnosti ugradnje odgovarajućih senzora [33].

Iako ugradnja senzora iziskuje minimalnu rekonstrukciju, ugradnjom senzora u neposrednoj blizini prednjeg ležaja glavnog motora ili na obradak, izmjereni signali ovise o puno faktora od kojih su najutjecajniji materijal obratka, parametri obrade te konstrukcijska struktura stroja [5].

5.2.4. Akustična emisija

Akustična emisija je fenomen prijelaza visokofrekventne energije nastale uslijed deformacije u materijalu. Akustična emisija proučava se u rasponu od 50 kHz do 2 MHz [5].

Prema [33] izvori akustične emisije mogu se podijeliti na:

- Kontinuirane:
 - plastična deformacija u obratku,
 - plastična deformacija u odvojenoj čestici,
 - kontakt trenjem između prednje površine alata i odvojene čestice,
 - kontakt trenjem između stražnje površine alata i obratka.
- Skokovite (tranzijentne):
 - kolizija odvojene čestice s alatom,
 - krhanje ili lom alata,
 - stvaranje pukotina u odvojenoj čestici.

5.3. Filtriranje signala

U današnje se vrijeme velik broj industrijskih mjernih sustava korištenih u nadzoru trošenja reznih alata isporučuje s već ugrađenim filtrom signala [31].

Postupak filtriranja signala odvija se u više koraka. U prvom koraku (analogna predobrada) frekvencijsko područje signala odgovarajućeg senzora sužava se na područje predviđeno njegovim tvorničkim specifikacijama. U idućem koraku (digitalna predobrada) frekvencijski pojas signala dodatno se sužava s ciljem prigušivanja komponenti koje nisu povezane s procesom trošenja, a dio su obradnog procesa [33].

Prilikom estimacije stupnja istrošenosti alata šumovi mogu nastati od vibracije stroja koje nisu uzrokovane trošenjem alata, deformacijom i lomom odvojenih čestica, itd. Odabir vrste filtera ovisit će o karakteristikama signala, stroja, obratka, parametara obrade, kao i ostalim uvjetima obrade. Postupak filtriranja nije jednoznačno definiran i za svaki konkretan slučaj ga je potrebno pažljivo odrediti s obzirom na individualne karakteristike procesa. Tako se izbjegava prigušivanje i onih dijelova signala koji su nositelji korisnih informacija o stanju oštrice reznog alata [31].

Ako je frekvencijsko područje razmatranih signala unaprijed poznato i potpuno definirano, što je karakteristika signala sila i jakosti struja, uobičajena je pojedinačna ili kombinirana primjena nisko i visoko propusnih, te pojasno propusnih i nepropusnih filtera. Međutim, postoje i signali kod kojih to nije slučaj, što je primjerice karakteristika signala akustične emisije [33].

Signali akustične emisije prilikom obrade sadrže harmonike deformacije i loma odvojene čestice, te sudara čestica s alatom, kao i ostale izvore šuma. Iz navedenog razloga, kod filtriranja takvih signala učinkovitom se pokazala primjena diskretne wavelet transformacije [5].

5.4. Značajke trošenja

Paralelno s razvojem modela nadzora trošenja reznih alata, rađene su i analize karakteristika različitih vrsta i oblika značajki trošenja s obzirom na kvalitetu procjene stupnja istrošenosti. Značajke se mogu kategorizirati u četiri osnovne skupine [Tablica 4] s obzirom na karakteristike metoda korištenih u analizi snimljenih signala procesa [34].

Tablica 4. Podjela značajki trošenja [34]

Skupina	Vrsta značajke	Napomena
Statističke značajke	<ul style="list-style-type: none"> • Aritmetička sredina • Varijanca • Standardna devijacija • Koeficijenti spljoštenosti i asimetrije 	Opisuju distribuciju vjerojatnosti u procesu trošenja
	<ul style="list-style-type: none"> • Autoregresija (<i>AR</i>) • Pomični prosjek (<i>MA</i>) • Autoregresijski model pomičnih prosjeka (<i>ARMA</i>) 	Modeliranje signala korištenjem vremenskih serija
	<ul style="list-style-type: none"> • Različiti koeficijenti graničnih vrijednosti • Križna korelacija • Harmonijska sredina 	Ostale rjeđe zastupljene statističke značajke
Značajke iz vremenskog područja	<ul style="list-style-type: none"> • Prosječne i efektivne (<i>RMS</i>) vrijednosti signala unutar nekog vremenskog intervala • Kratkotrajne promjene vrijednosti u signalima • Omjeri sila, faktori krijeste, polinomne aproksimacije signala 	Većinom korištene kod obrade signala sila i momenta
Značajke iz frekvencijskog područja	<ul style="list-style-type: none"> • Dominantne amplitude/snage spektra • Spektralna gustoća snage cijelog spektra • Spektralna gustoća snage u pojedinim segmentima signala (međusobno susjednih ili dijelom preklapajućih frekvencijskih pojaseva) • Frekvencija najveće amplitude spektra • Ukupna snaga signala u okolini frekvencije najveće amplitude spektra 	Značajke dobivene primjenom Fourierove transformacije
Značajke iz vremensko frekvencijskog područja	<ul style="list-style-type: none"> • Koeficijenti transformacije 	Značajke vezane gotovo isključivo uz wavelet transformaciju signala

Može se primijetiti da su kod signala nižih frekvencija (sile, struje) najviše zastupljene značajke iz vremenskog područja, dok su kod visokofrekventnih signala (akustična emisija, vibracije) na prvom mjestu značajke iz frekvencijskog područja [34].

5.5. Odabir značajki trošenja

Kvalitetan odabir skupa značajki trošenja, koje u aktualnom koraku klasifikacije/estimacije mogu s potrebnom preciznošću kvantificirati stupanj istrošenosti alata, predstavlja posljednji i iznimno značajan korak postupka obrade signala. Proces odabira značajki, u većini slučajeva ima za cilj odabrati optimalan broj značajki, a nakon toga najpogodniji skup značajki, s obzirom na razlučivost stupnja istrošenosti svake značajke individualno. Iako je u pravilu bolje koristiti što veći broj nezavisnih značajki, preveliki broj može uzrokovati pretreniranost neuronskih mreža, a to dovodi do smanjenja generalizacijskih svojstava mreža, a samim time i lošije kvalitete odziva [34].

5.6. Model indirektnog nadzora procesa trošenja

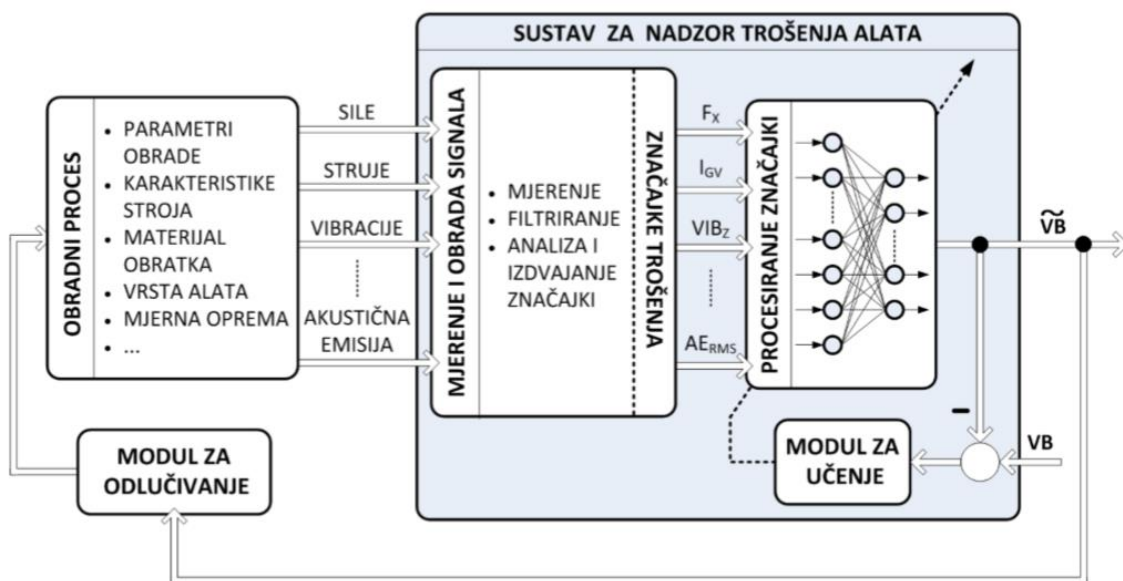
Potencijal modela trebao bi biti višestruk, od sprječavanja loma alata do kontinuiranog praćenja njegova stupnja istrošenosti u cilju optimiranja različitih parametara obrade, kao što su primjerice kvaliteta površine, točnost dimenzija ili skraćivanje vremena obrade. Svaki sustav nadzora mora nužno imati mogućnost prikupljanja informacija o obradnom procesu primjenom različitih vrsta senzora, biti u stanju obraditi snimljene signale i izdvojiti relevantne značajke trošenja, posjedovati svojstvo kontinuirane adaptacije strukture s obzirom na različite uvjete obrade, te osigurati brz i precizan odziv [33].

Tvrdoća kamena može jako varirati u zoni obrade, a proces obrade kamena s visokim stupnjem automatizacije moguć je isključivo uz kvalitetni sustav za nadzor alata [5].

Sustav za nadzor stanja procesa obrade mora se sastojati od nekoliko modula prema [33]:

- Modul indirektnog mjerenja,
- modul za prihvatanje i obradu signala,
- modul paralelnog procesiranja značajki trošenja,
- modul za učenje i adaptaciju strukture.

Istraživanje modeliranja dinamike trošenja reznih alata dovelo je do razvoja niza modela trošenja temeljenih na klasičnim matematičkim algoritmima (Bayesov klasifikator, metoda najbližih susjeda, linearni diskriminatori, stohastički aproksimatori i dr.). Pokazalo se, da je taj proces zbog svoje izrazite nelinearnosti i djelomične stohastičnosti vrlo teško opisati pomoću klasičnih matematičkih modela. Osim toga, procjene stupnja istrošenosti reznog alata u realnom vremenu, primjenom samo jedne vrste snimanih signala procesa također nisu postigle potreban stupanj pouzdanosti i robusnosti u industrijskim uvjetima. Pretpostavlja se da bi primjena višesenzorskog pristupa i klasifikatora/estimatora trošenja zasnovanih na algoritmima umjetne inteligencije trebala rezultirati industrijski primjenjivim rješenjima nadzora trošenja reznih alata. Među najčešće korištene algoritme spadaju umjetne neuronske mreže, čija je dominacija i danas prisutna. Razloge njihove značajnije zastupljenosti treba tražiti u mogućnostima modeliranja složenih nelinearnih procesa često opisanih s nedovoljno informacija, prigušivanja šumova u signalima nastalih zbog stohastičke prirode procesa trošenja, adaptacije na različite uvjete obrade i vrste trošenja te mogućnostima brzog procesiranja veće količine informacija. Navedene prednosti dolaze upravo do izražaja u problemima procjene stupnja istrošenosti oštrice alata gdje ne postoji adekvatni matematički model trošenja. Dinamika procesa je u ovom slučaju određena strukturom mreže definiranom u postupku učenja primjenom informacija prikupljenih različitim vrstama senzora. Na slici 34 prikazan je sustav nadzora istrošenosti reznog alata [34].



Slika 34. Shematski prikaz sustava nadzora istrošenosti reznog alat [33]

6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U nadolazećem poglavlju opisana je izrada postava za regulaciju SHIP-a po tlaku i protoku za medije: zrak, voda i kombinacija zrak/voda. Navedeni su hidraulički, pneumatski i elektronički elementi koji su potrebni za ostvarivanje regulacije SHIP-a, te elementi postava za bušenje i mjerna oprema koja je korištena u eksperimentu.

6.1. Eksperimentalni postav za regulaciju SHIP-a

Sustav [Slika 37 i 38] za regulaciju SHIP-a, ima zadatak reagirati na zahtjev za potrebnim tlakom ili protokom na izlazu iz sustava i ostvariti ga, te osigurati kontinuiranu dobavu SHIP-a kroz svrdlo u zonu obrade.

6.1.1. Konstrukcija postava

Nakon početne izrade hidrauličkih i pneumatskih shema, elementi postava [Slika 37] pričvršćeni su na ploču lima dimenzija 580 x 380 x 2 milimetara, te je tako dobiven konačan raspored uz mogućnost nadopune sustava. Za dodatno pričvršćivanje elemenata (npr. senzori tlaka, senzor protoka, T - spojnice) korišteni su aluminijski blokovi u kojima su izbušeni provrti, te je narezan navoj i s vijcima su spojeni za ploču lima. Po visini, sa svake strane, postavljeni su aluminijski profili duljine 420 milimetara, a pomoću kutnih elemenata, spojeni su za dva aluminijska profila duljine 330 milimetara, koji predstavljaju postolje postava i osiguravaju stabilnost. S gornje strane stavljen je jedan aluminijski profil duljine 500 milimetara po duljini postava, a također je pomoću kutnih elemenata spojen s bočnim profilima.

6.1.2. Hidraulički i pneumatski elementi postava

Od ukupno tri voda (dva za vodu i jedan za zrak), drugi vod, namijenjen za vodu, ostavljen je slobodan zbog moguće nadogradnje sustava pumpom, koja će ostvarivati znatno manje protoke, ili nekim drugim elementom. Postolje za spremnik SHIP-a, izrađeno je od ploče lima i savinuto tako da su bočne strane savinute malo preko 90° kako bi se onemogućilo pomicanje spremnika. Tablica 5 prikazuje hidrauličke, a tablica 6 pneumatske elemente i njihove značajke. Zrak se dobavlja iz pripremljene grupe - kompresora.

Tablica 5. Hidraulički elementi

Element	Količina	Značajke
Spremnik	1	Kapacitet 7 litara – dobava vode (SHIP-a)
T – spojnica	4	Usmjeravanje fluida
Pumpa	1	Osiguravanje tlaka i protoka
Senzor tlaka	2	Mjerenje tlaka
Manometar	2	Mjerenje tlaka
Ekspanzijska čahura	1	Akumulator – pohrana hidrauličke energije
Servo – ventil	1	Regulacija tlaka i protoka (nalazi se u gornjem vodu)
Ručni protočni ventil	1	Regulacija tlaka i protoka (nalazi se u donjem vodu)
Senzor protoka	1	Mjerenje protoka
Koljeno	8	Usmjeravanje fluida
Redukcija 8-6	1	Redukcija cijevi sa ϕ 8 na ϕ 6
Ekspanzija 6-8	1	Ekspanzija cijevi sa ϕ 6 na ϕ 8

Tablica 6. Pneumatski elementi

Element	Količina	Značajke
Servo – ventil	1	Regulacija tlaka i protoka
T – spojnica	1	Usmjeravanje fluida
Senzor tlaka	2	Mjerenje tlaka
Vakuu generator – venturijska cijev	1	Mjerni instrument pomoću kojeg se razlikom tlakova dobiva brzina strujanja fluida. Tlak na sredini je niži nego na početku, a brzina je veća.
Nepovratni ventil	1	Omogućava protok fluida u jednom smjeru
Koljeno	1	Usmjeravanje zraka fluida

U radu je korištena hidrostatička pumpa [Tablica 7], koja dobro radi za fluide šireg područja viskoznosti, ima dobar omjer veličine i snage, efikasna je u širokom području rada, dobra je volumenska efikasnost i može pokriti širok raspon zahtjeva za brzinom i tlakom [35].

Tablica 7. Karakteristike pumpe

Način napajanja	Istosmjerna struja
Iznos potrebnog napajanja	24 V
Snaga (maksimalna)	60 W
Protok (maksimalan)	5 l/min
Tlak (maksimalan)	8 bar (0,8 MPa)

Uloga akumulatora - ekspanzijske čahure [Tablica 8] je prema [35]:

- spremnik energije za krugove koji se kratko koriste, kratki rad crpki,
- pokrivanje potrebe za kratkotrajnom vršnom hidrauličkom energijom,
- operacije u nuždi,
- kompenzacija curenja,
- amortizacija udara, te neravnomjernosti protoka.

Tablica 8. Karakteristike akumulatora - ekspanzijske čahure

Tlak (maksimalan)	10 bar (1 MPa)
Tlak (pred punjenja)	3 bar (0,3 MPa)
Volumen	8 l
Temperaturno radno područje	Od -10°C do 99°C

Senzor protoka [Tablica 9] broji impulse u vremenu i dobiva se frekvencija, koja pomnožena s odgovarajućim faktorom, izraženim u litrama, daje protok.

Tablica 9. Karakteristike senzora protoka [36]

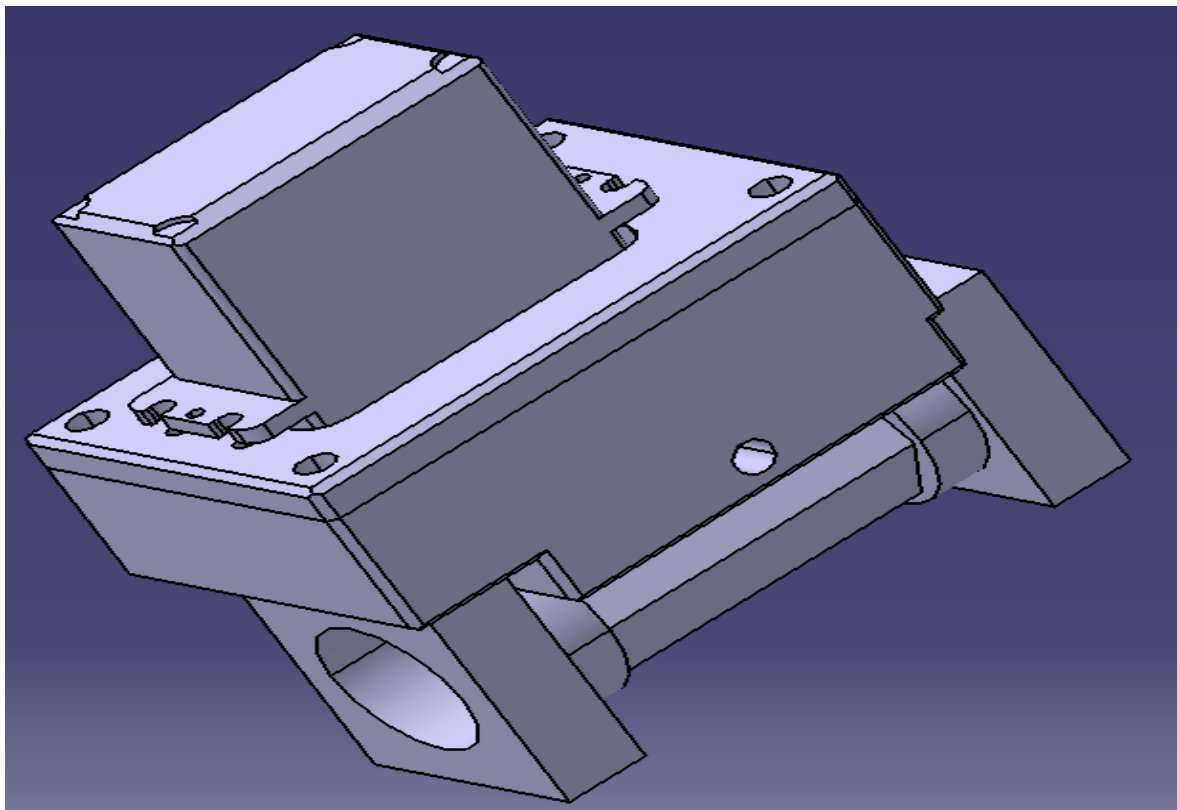
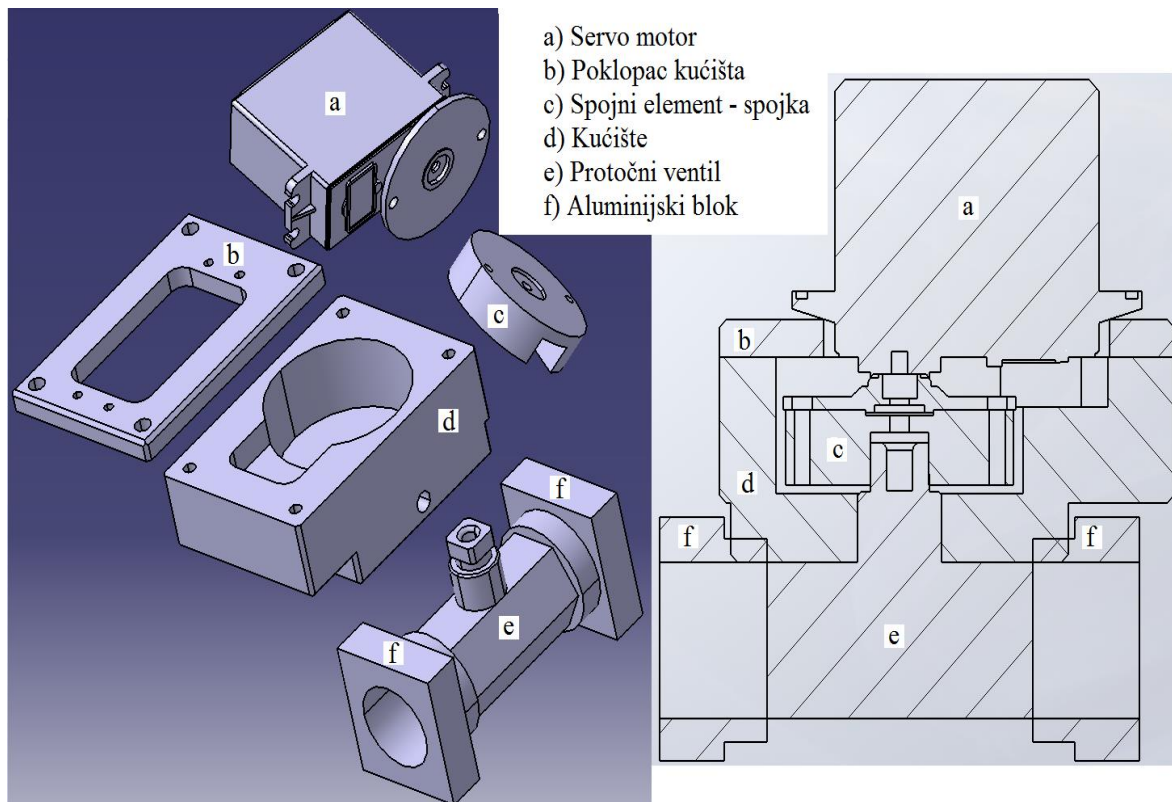
Najmanji ostvarivi protok	0,1 l/min
Najveći ostvarivi protok	4,5 l/min
Način napajanja	Istosmjerna struja
Iznos potrebnog napajanja	Od 3 V do 18 V
Preporučani/standardni napon napajanja	5 V
Tlak (maksimalan)	8 bar (0,8 MPa)
Preciznost	±3%

6.1.3. Servo ventil

Servo – ventil [Slika 35] konstruiran je pomoću ručno upravljano ventila i servo motora iz financijskih razloga i dostupnosti opreme. Nakon početne izrade modela u programskom paketu Catia, odabran je nastavak u obliku „tanjura“ za povezivanje s ventilom. Međuelement predstavlja spojni element – spojka, koja je vijcima pričvršćena za nastavak servo – motora („tanjur“). Zadaća mu je regulirati i održavati konstantan tlak i protok u sustavu otvaranjem i zatvaranjem protočnog ventila. Elementi servo – ventila nalaze se unutar kućišta koje daje krutost i onemogućava pomicanje. Na slici 35 gore lijevo prikazan je servo – ventil u presjeku, a gore desno su pojedinačni elementi od kojih se sastoji. Karakteristike servo - motora dane su prema [37] u tablici 10.

Tablica 10. Karakteristike servo - motora [37]

Karakteristika	Iznos
Napon	4,8-6 V
Brzina	0,2 s / 60° (4,8 V)
Moment	0,94 Nm (4,8 V)
Napajanje	5-7 V
Vrsta signala	Digitalni
Materijal zupčanika	Metalni
Tip motora	Bez četkica



Slika 35. Servo ventil

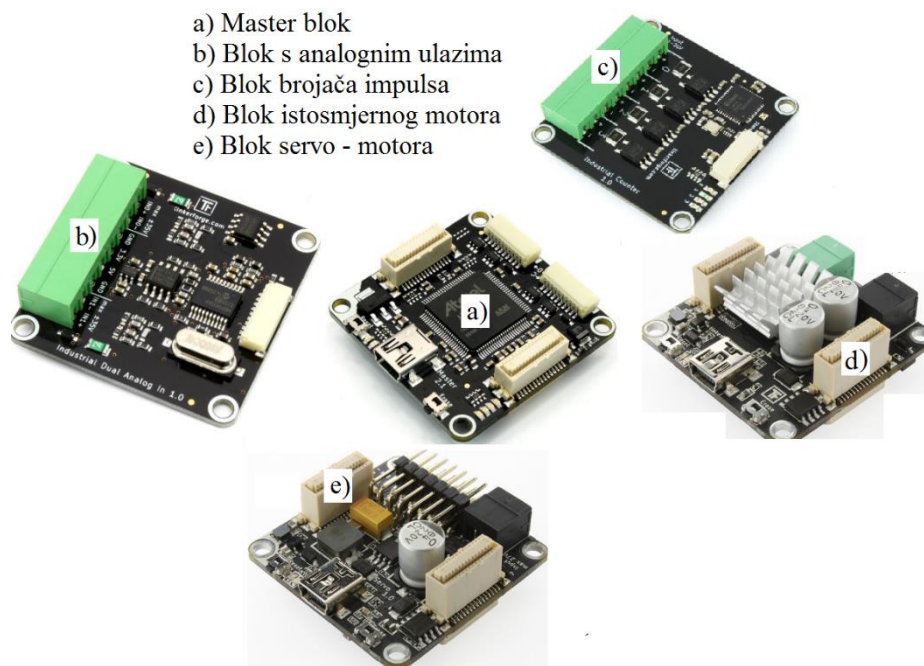
6.1.4. Elektronički dio postava

Tablica 11 prikazuje elemente elektroničkog sklopa i njihove količine.

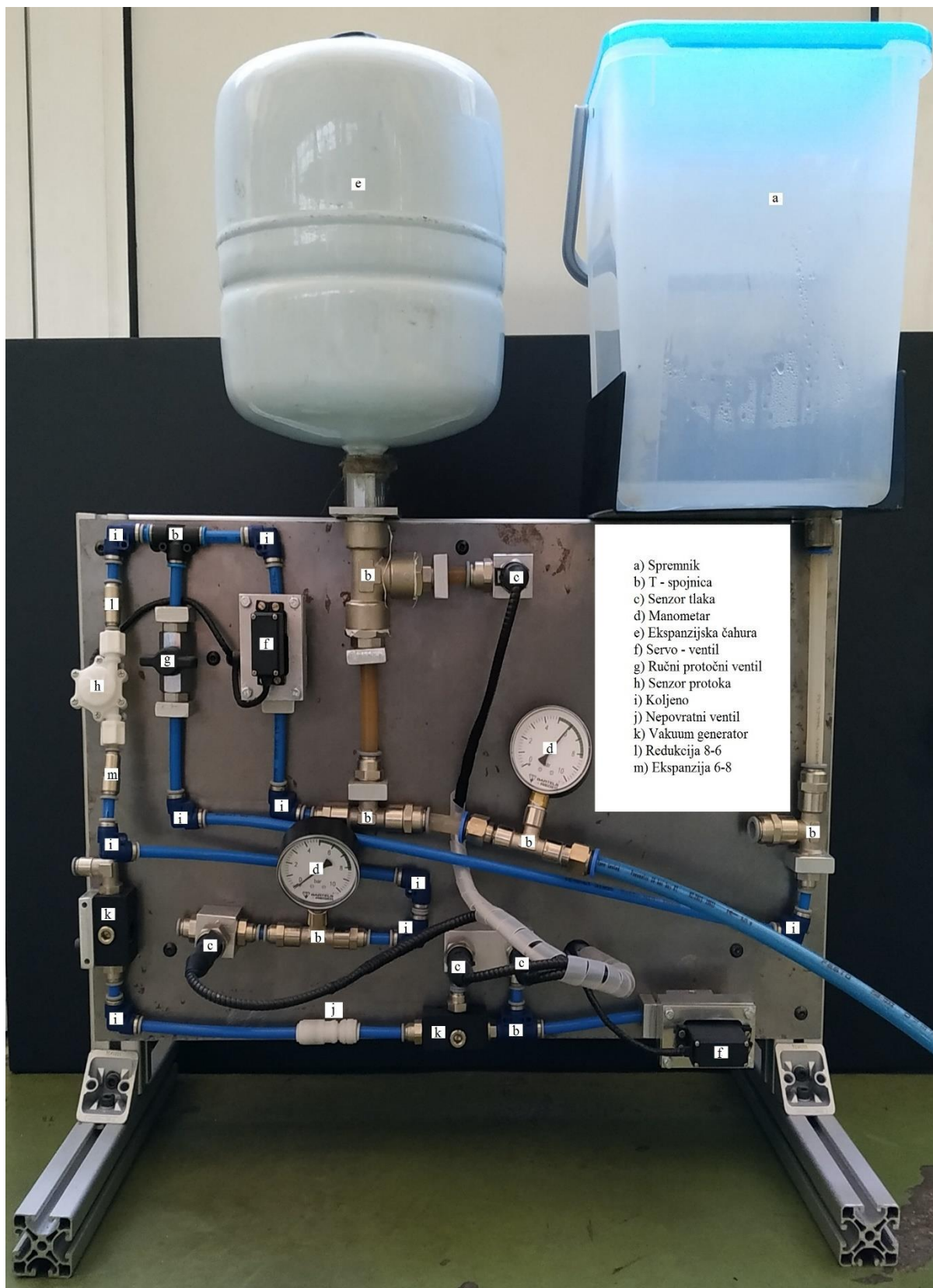
Tablica 11. Elektronički elementi

Element	Količina
Mean well ispravljač EDR-120-12	2
Mean well sklopno napajanje MDR-20-5	1
Rasperbby pi	1
Redne stezaljke	4
Redne stezaljke	2
Sklop Tinkerforge	1

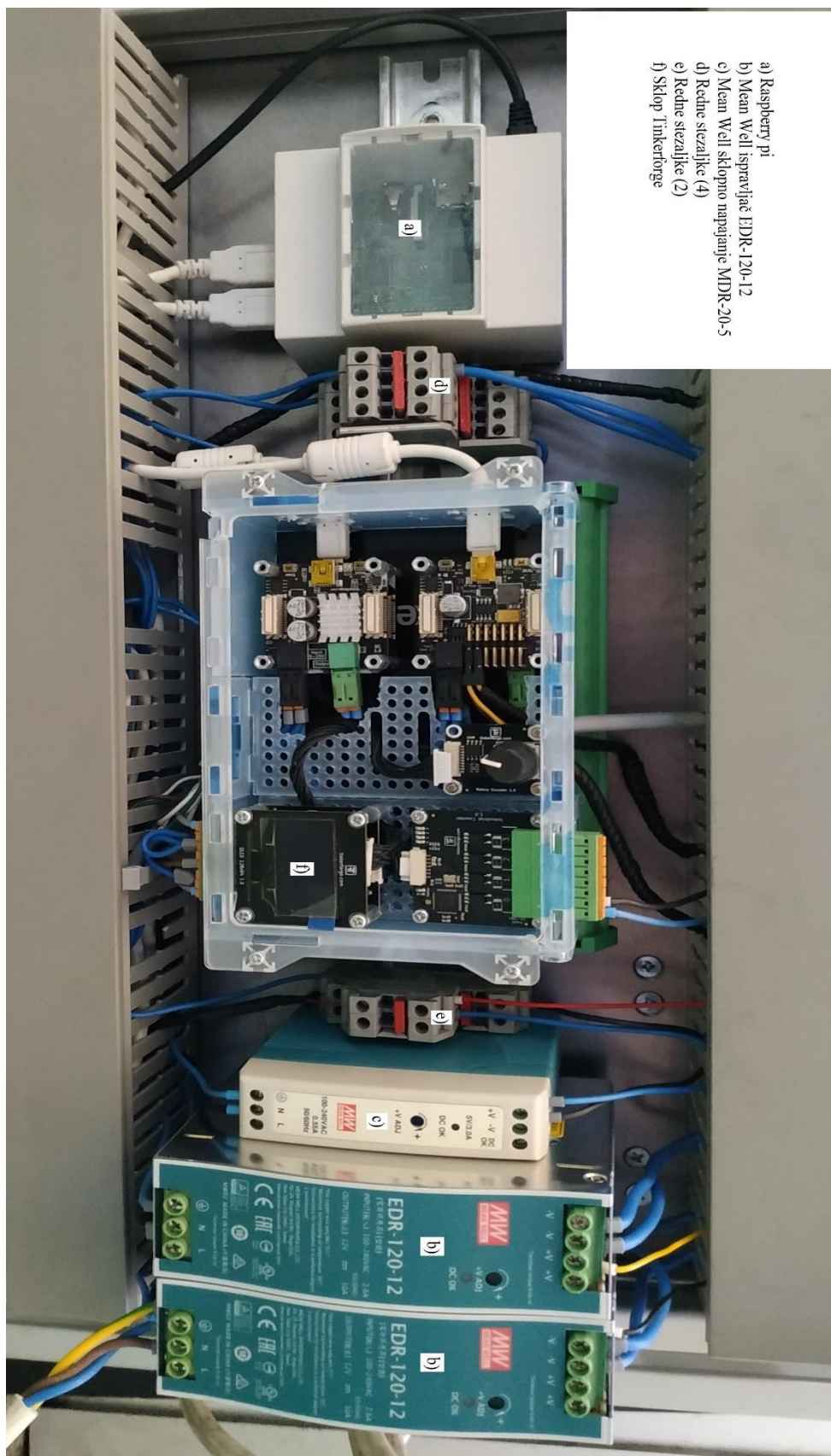
Prvi ispravljač spaja se na napon mreže i na izlazu daje istosmjernu struju koja napaja senzor protoka. Ispravljači su spojeni u seriju, te drugi ispravljač na izlazu daje istosmjernu struju koja napaja redne stezaljke (4) – koje dalje napajaju sklop Tinkerforge. Sklopno napajanje Mean well MDR-20-5 napaja Raspberry pi, pomoću kojeg je osigurano povezivanje sa sklopom Tinkerforge i s računalom na daljinu. Elementi sklopa Tinkerforge prikazani su na slici 36.



Slika 36. Elementi sklopa Tinkerforge [38]



Slika 37. Postav za regulaciju SHIP-a 1



Slika 38. Postav za regulaciju SHIP-a 2

6.2. Eksperimentalni postav za bušenje i mjerna oprema

Eksperimentalni postav korišten u ovom radu, namijenjen za bušenje kamena prikazan je na slici 39. Kompletan postav realiziran je u Laboratoriju za alatne strojeve, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



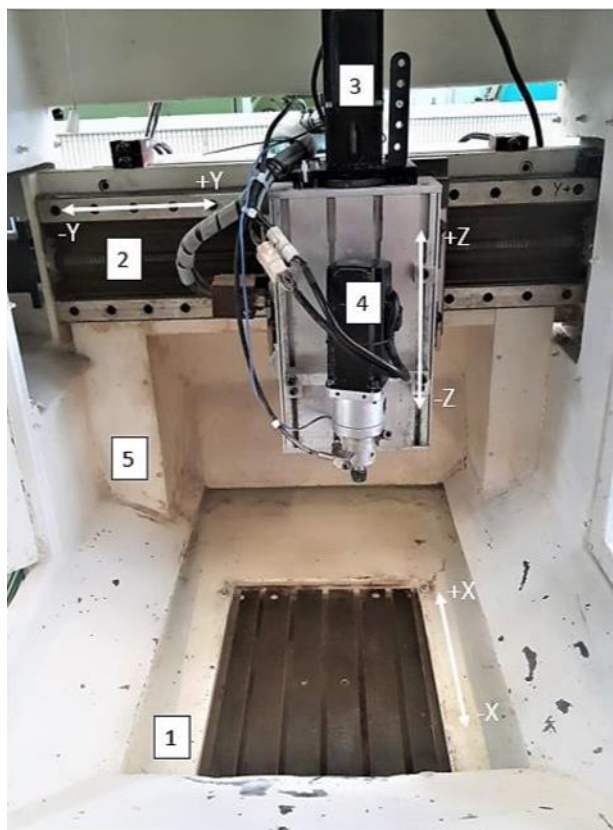
Slika 39. Eksperimentalni postav [33]

Glavni i posmični prigoni ispitnog stroja dimenzionirani su tako da očekivani poremećaji u signalima struja budu mjerljivi s obzirom na očekivane sile rezanja kod bušenja kamena. U radni prostor stroja [Slika 43] ugrađeni su tro-komponentni senzori sila i vibracija, senzor akustične emisije, te industrijska kamera za direktno određivanje parametara trošenja.

6.2.1. Konstrukcija stroja

Slika 40 prikazuje tro – osnu glodalicu, a tehničke karakteristike stroja dane su u tablici 12 prema [5]. Zavarena portalna konstrukcija čini osnovu ispitnog stroja. Na postolje su postavljene kotrljajuće vodilice posmičnih prigona. Pomični radni stol vrši translacijsko gibanje po osi X, dok preostala dva translacijska gibanja po osima Y i Z vrši alat.

Posmično gibanje ostvareno je kugličnim navojnim vretenom. Pogoni posmičnih prigona i pogon glavnog gibanja realizirani su upotrebom sinkronih servo motora s permanentnim magnetima i opremljeni su inkrementalnim enkoderima.



1. Posmični prigon X osi
2. Posmični prigon Y osi
3. Posmični prigon Z osi
4. Prigon glavnog gibanja
5. Postolje stroja

Slika 40. Prikaz unutrašnjosti tro – osne glodalice [12]

Tablica 12. Osnovne tehničke karakteristike ispitnog stroja [5]

		Iznos	Jedinica
Hod osi	X	350	mm
	Y	450	
	Z	55	
Korak navojnog vretena osi	X,Y,Z	5	mm
Maksimalna posmična brzina osi	X,Y,Z	15	m/min
	C	+/- 360	°
Nazivna učestalost vrtnje GV		3000	min ⁻¹
Maksimalna učestalost vrtnje GV		5000	min ⁻¹

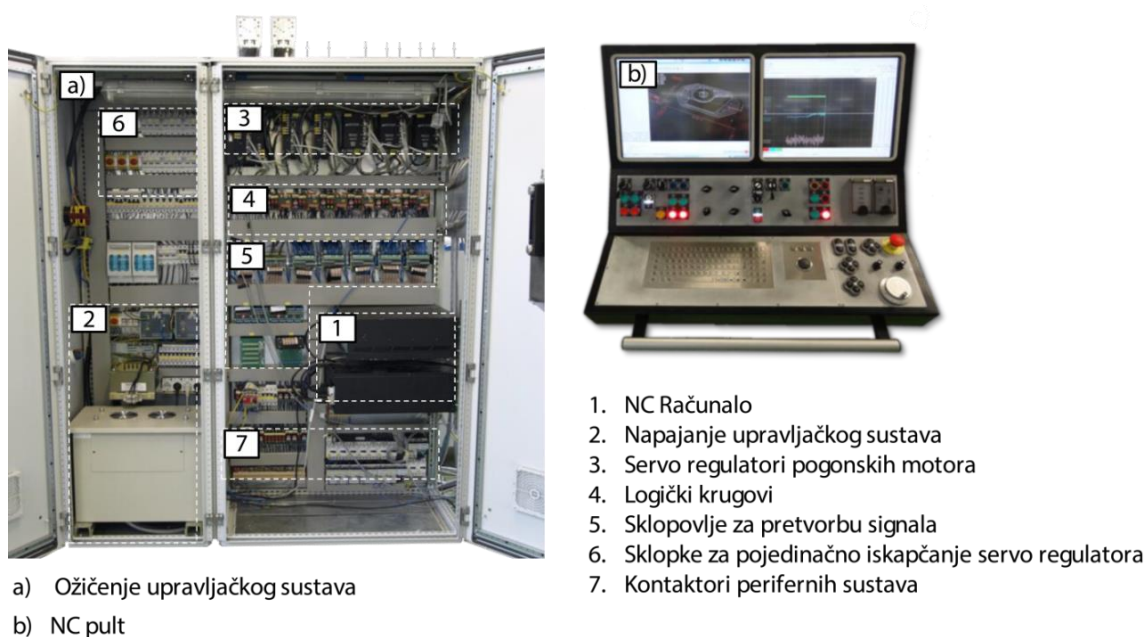
Za potrebe eksperimenta i s ciljem postizanja boljeg i točnijeg stezanja, ali i centriranja samog alata izrađen je modul glavnog prigona prikazan na slici 41. Modul nudi mogućnost protočnog hlađenja, kao i postavljanje senzora akustične emisije i vibracija neposredno pokraj prednjeg ležaja.



Slika 41. Modul glavnog prigona [5]

6.2.2. CNC sustav

Temeljni dio upravljačkog dijela sustava čini otvoreni CNC upravljački sustav EMC2 (Enhanced Machine Controller) koji je integriran na NC računalo s napajanjima, servo regulatorima i ostalim ulazno – izlaznim sklopovljem. Cijelo sklopovlje smješteno je unutar elektro ormara prikazanog na slici 42. Upravljački sustav sadrži regulatore glavnih i posmičnih gibanja, sklopovlje za prilagodbu upravljačkih i mjernih signala te logičkih sklopova i kontaktora za kontrolu SHIP-a. Navedenim sustavom moguće je upravljanje, simultano do šest posmičnih osi i dva glavna vretena. Zbog mogućnosti obrade signala za vrijeme upravljanja alatnim strojem, odabrana je konfiguracija koja osigurava istovremeno snimanje i obradu signala, ali i izvršavanje različitih algoritama temeljenih na računalnoj inteligenciji [5].

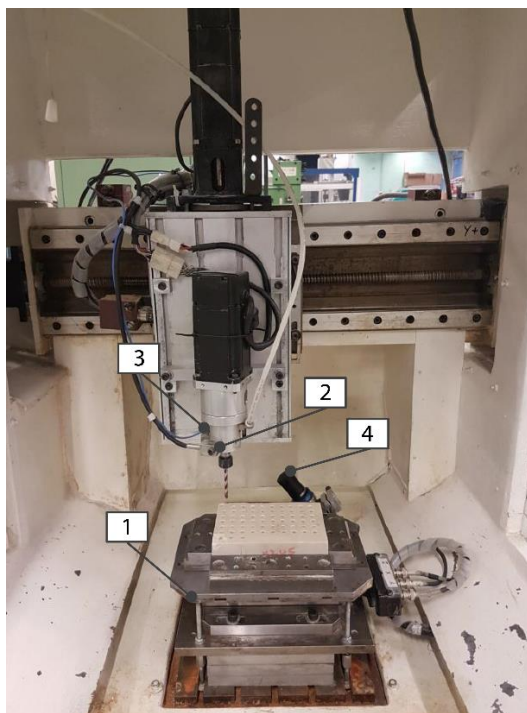


Slika 42. Elementi upravljačkog sustava [5]

6.2.3. Mjerni sustavi stroja

Signali struja pogonskih motora prikupljaju se kontinuirano tijekom procesa pomoću komunikacijskog modula s CAN sučeljem. Vanjsko mjerno računalo s prijenosnom modularnom mjernom stanicom osigurava korištenje dodatnih industrijskih kamera i kvalitetnijeg nadzora procesa uz višu razinu kontrole eksperimenta. Navedeno računalo također je korišteno za izvršavanje mjerne aplikacije te kao poslužitelj za udaljeno prikazivanje grafičkog dijela LinuxCNC sustava. Mjerno računalo služi i za snimanje slikovnih podataka (periodički prema planu eksperimenta) vezano uz trošenje rezne oštrice pomoću direktne metode nadzora industrijskom kamerom. Ovo rješenje s vanjskim mjernim računalom osigurava da se izbjegne moguća pogreška prilikom unosa pojedinih parametara koji utječu kvalitetu i pravilan tok procesa. Popis veličina i mjernih sustava prikazani su u tablici 13 [33].

Signali sa senzora sila i struja sadrže cjelovitu informaciju o stanju procesa prije, za vrijeme i nakon zahvata svrdla i kamena. Signali vibracija i akustične emisije snimani su samo kratkotrajno u određenim vremenskim intervalima zbog velike količine prikupljenih podataka tijekom jednog ciklusa bušenja, te nemogućnosti pohrane signala zbog hardverskog ograničenja. Početak snimanja zadaje se naredbom iz NC programa pomoću okidačkog signala [5].



1. Senzor sila (tro- komponentni)
2. Senzor akustične emisije
3. Senzor vibracija (tro- komponentni)
4. Industrijska kamera s telecentričnim objektivom i rasvjetom

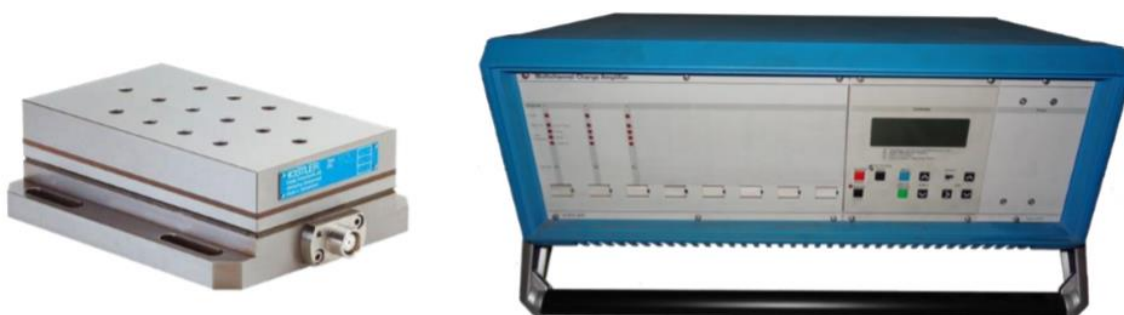
Slika 43. Prikaz postojećih senzora na ispitnom stroju [5]

Tablica 13. Veličine i mjerni sustavi potrebni za provođenje eksperimenta [5]

Mjerena veličina	Vrijeme snimanja	Frekvencija uzorkovanja	Mjerni sustav	Prikupljanje signala	
				NC računalo	Vanjsko mjerno računalo
Sile rezanja u smjeru X, Y i Z osi	Kontinuirano tijekom bušenja	2 kHz	Senzor sila		✓
Vibracije u smjeru X, Y i Z osi	Kratkotrajno (2 s)	5 kHz	Senzor vibracija	✓	
Akustična emisija	Kratkotrajno (0,1 s)	2 MHz	Senzor akustične emisije	✓	
Parametri trošenja	Periodički prema planu eksperimenta	/	Industrijska kamera		✓

6.2.3.1. Senzor sila

Mjerenje sila tijekom procesa bušenja provodi se primjenom mjernog sustava prikazanog na slici 44. Sustav se sastoji od tro – komponentnog senzora sila i nabojnog pojačala. Tro - osni senzor sila smješten je na radni stol te se na njega nadovezuje stezna naprava za prihvata ispitnih uzoraka. Signali se prikupljaju pomoću vanjskog mjernog računala i mobilne mjerne stanice. Tehničke karakteristike obje komponente sustava sila prikazane su tablici 14.



Slika 44. Senzor sila i pripadajuće nabojno pojačalo [33]

Tablica 14. Tehničke karakteristike senzora sila i pripadajućeg nabojnog pojačala [5]

			Područje	Jedinica
Senzor sila (tip 9257B)	Mjerno područje	F_x, F_y	-5 ... 5	kN
		F_z	-5 ... 10	
	Maksimalne dozvoljene sile	F_x, F_y	-7,5/7,5	
		F_z	-7,5/15	
	Osjetljivost	F_x, F_y	-7,5	pC/N
F_z		-3,7		
Nabojno pojačalo (tip 5017B)	Broj kanala		3 (do 8)	
	Mjerno područje (podesivo po kanalu)		$\pm 10 \dots 10^6$	pC
	Frekvencijsko područje		0 ... 200	kHz
	Osjetljivost (podesiva po kanalu)		0,01 ... 9990	pC/N
	Skaliranje mjerne veličine (podesivo po kanalu)		0,001 ... 10^7	N/V
	Izlazni signal (po kanalu)		± 10	V

6.2.3.2. Senzor vibracija

Mjerenje vibracija tijekom procesa bušenja provodi se primjenom mjernog sustava prikazanog na slici 45. Sustav se sastoji od tro – komponentnog piezo - električnog akcelerometara i nabojnog pojačala. Senzor vibracija ugrađen je neposredno u blizini prednjeg ležaja prigona glavnog vretena postavljenog u ležište za senzor. Tehničke karakteristike obje komponente sustava vibracija prikazane su u tablici 15.



Slika 45. Senzor vibracija i pripadajuće nabojno pojačalo [33]

Tablica 15. Tehničke karakteristike senzora vibracija i pripadajućeg nabojnog pojačala [5]

		Područje	Jedinica
Senzor vibracija (tip 8688A50)	Mjerno područje akceleracije	± 50	g
	Maksimalna dozvoljena akceleracija	± 80	
	Osjetljivost ($\pm 10\%$)	100	mV/g
	Frekvencijsko područje	0,5 ... 5000	Hz
Nabojno pojačalo (tip 5134B)	Broj kanala	4	
	Vremenska konstanta ulaznog kruga	10/1/0,1/0	s
	Programibilni faktor pojačanja	0,5 ... 150	
	Programibilni nisko propusni filter (-3dB)	0,001 ... 10^7	Hz
	Izlazni signal (po kanalu)	$\pm 10, \pm 5$	V

6.2.3.3. Senzor akustične emisije

Mjerenje akustične emisije tijekom procesa bušenja provodi se primjenom mjernog sustava prikazanog na slici 46. Sustav se sastoji od piezo - električnog senzora i odgovarajućeg sklopa za prihvata signala akustične emisije. Senzor akustične emisije ugrađen je neposredno u blizini prednjeg ležaja prigona glavnog vretena postavljenog u ležište za senzor. Sklop za prihvata signala akustične emisije nudi funkciju snimanja i istovremenog filtriranja primjenom pojasno - propusnog filtra u rasponu od 50 do 400 kHz definirano od strane proizvođača. Tehničke karakteristike obje komponente sustava akustične emisije prikazane su u tablici 16.



Slika 46. Senzor akustične emisije i pripadajući sklop za prihvata signala akustične emisije [33]

Tablica 16. Tehničke karakteristike senzora akustične emisije i pripadajućeg sklopa za prihvata signala akustične emisije [5]

		Područje	Jedinica
Senzor AE (tip 8152B1/12sp)	Frekvencijsko područje ($\pm 10\text{dB}$)	50 ... 400	kHz
	Osjetljivost	57	$\text{dB}_{\text{ref}} 1\text{V}/(\text{m/s})$
Sprežnik (coupler) u zadanoj konfiguraciji (tip 5125B)	Visoko propusni filter	50	kHz
	Nisko propusni filter	500	kHz
	Integracijska vremenska konstanta	1,2	Ms
	Izlazni signal	0 ... ± 5	V

6.2.3.4. Vizijski sustav direktnog nadzora trošenja

Sklop vizijskog sustava za direktan nadzor trošenja tijekom procesa bušenja sastoji se od industrijske kamere, telecentričnog objektiva i pripadajućeg prstena za rasvjetu prikazanih na slici 47. Kamera je orijentirana tako da u određenoj poziciji (nul-točki) svrdla optička os kamere odgovara normali u središtu glavne oštrice svrdla. Kamera se spaja na mjerno računalo putem *USB 3.0* veze. Upotreba telecentričnog objektiva za mjerenje istrošenosti reznih oštrica svrdla osigurava minimalnu radijalnu distorziju u cijelom području interesa. Tehničke karakteristike navedenih komponenata vizijskog sustava prikazane su u tablici 17.



Slika 47. a) Industrijska kamera prema [39], b) Telecentrični objektiv prema [40], c) Prsten za rasvjetu prema [41]

Tablica 17. Tehničke karakteristike vizijskog sustava [5]

		Područje	Jedinica	
Industrijska Kamera (DMK23UX174)	Rezolucija	1920x1200	piksela	
	Osjetljivost	0,05	lx	
	Frekv. osvježavanja slike	25 ... 50	Hz	
	Format osjetilnog senzora	1/2	in	
	Izvedba osjetilnog senzora	CMOS Pregius		
	Prihvat objektiva	C/CS		
Telecentrični Objektiv (TC2309)	Vidno polje (za format senzora 1/2")	6,4x4,8	mm	
	Radna udaljenost	62,2	mm	
	Dubinska oštrina	0,9	mm	
	Distorzija	tipična	<0,04	%
		maksimalna	0,08	
	Telecentričnost	tipična	<0,08	°
maksimalna		0,10		
Rezolucija mjernog sustava u opisanoj konfiguraciji		5	μm	

6.2.4. Korisničko sučelje mjernog sustava

Cjeloviti nadzor eksperimenta obavljen je pomoću mjernog računala. Omogućeno je spajanje na mjerno računalo s neke udaljene lokacije. Mjerna aplikacija nudi mogućnost zadavanja parametara obrade, snimanje signala u trenutku obrade, verifikacija rezultata te generiranje mjerne datoteke.

Dubina bušenja je 15 milimetara, a određena je u sklopu ranijih ispitivanja [5].

Prije pokretanja snimanja signala potrebno je u navedenoj aplikaciji unijeti iduće parametre koji se koriste kod kreiranja imena datoteka generiranih tijekom snimanja signala:

- oznaka svrdla (T),
- promjer svrdla (D),
- stupanj istrošenosti (W),
- operater (O),
- kut bušenja (A),
- oznaka kamena (K),
- oznaka mjerenja (E),
- brzina rezanja (V_c),
- posmak (F),
- tip podmazivanja (L),
- tlak ili protok (P_f ili Q_f).

Na temelju ručno unesenih parametara u sučelje aplikacije, generira se *NC* program kojim se vrši postupak bušenja. Nakon što je izvršen jedan ciklus postupka bušenja, dobivaju se podaci mjerenja u tri različite datoteke s točno definiranim nazivljem koje sadrži informacije o parametrima stanja pokusa i vrsti mjerenih signala. Prva datoteka s mjernim signalima sadrži podatke o silama rezanja i momentu glavnog vretena, druga i treća datoteka sadrže podatke o mjerenim signalima vibracija i akustične emisije.

Signali vibracija i akustične emisije snimaju se pomoću akvizicijske kartice smještene u *NC* računalu [5].

7. EKSPERIMENT

U sklopu ranijih istraživanja u laboratoriju katedre za alatne strojeve određene su vrste i dimenzije kamenih uzoraka potrebne za eksperiment. Idući korak bio je odrediti koje je odgovarajuće svrdlo za bušenje kamena. Na osnovi preporuke proizvođača alata, utvrđeni su parametri obrade (brzina rezanja i posmak) i dinamika trošenja ispitnog svrdla.

7.1. Ispitni uzorci

Glavni parametar izbora vrste kamenih uzoraka [Tablica 18] je njihova međusobna različitost u pogledu mehaničkih svojstva, te su na temelju svojstva izabrani sljedeći kameni uzorci i njihove oznake:

- Sivac Konavoski (*K1*),
- Mironja (*K2*),
- Sivec (*K3*).

Kamen oznake *K1* karakterizira svijetlo siva boja, a čine ga 80,94 % dolomit i 18,6 % kalcit svrstan u dolomite. Kamen oznake *K2* ima zrnatu teksturu, bijelo smeđe je boje s rijetkim svijetlo bijelim točkicama i rijetkim bijelim kalcitnim venama, čine ga 60 % mikrit, 35 % sparitni kalcit i 5 % su fosilni ostaci. Spada u skupinu slojevitih vapnenaca, Intramikrit. Kamen oznake *K3* čine 97,8 % dolomit i 2,2 % kalcit. Ima kompaktnu i zrnatu teksturu, te spada u skupinu dolomitnih mramora [5].

Tablica 18. Mehanička svojstva ispitnih uzoraka [5]

Vrsta kamena	K ₁	K ₂	K ₃
Komercijalni naziv kamena	Sivac Konavoski	Mironja	Sivec
Tlačna čvrstoća	P _{pros.} =136,8 MPa	P _{pros.} =169 MPa	P _{pros.} =162,10 MPa
Upijanje vode	ϑ = 2,08 %	ϑ = 0,07 %	ϑ = 0,1067 %
Prostorna masa	ρ=2570 kg/m ³	ρ=2690 kg/m ³	ρ=2850 kg/m ³
Poroznost	P=5,2 %	P=0,2 %	P=0,877 %
Tvrdoća*	1815 MPa	1620 MPa	2605 MPa

Ispitni uzorci dobiveni su iz većih kamenih komada na portalnom stroju za rezanje kamena, uz pozornost posvećenu smjeru izuzimanja i orijentaciji uzorka. Zbog velike hrapavosti površine, izazvanoj rezanjem uzoraka potrebno je bilo završno obraditi ispitne uzorke na konačne dimenzije 200 X 90 X 30 milimetara. Završna obrada bila je brušenje, a predmetni brus prikazan je na slici 48, a služi za postizanje ravnosti površina.



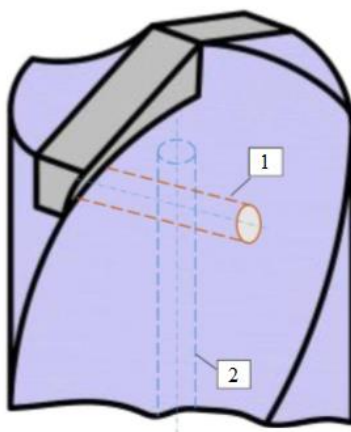
a) Dijamantni brus za brušenje

Slika 48. Alat za završnu pripremu uzoraka [5]

7.2. Ispitno svrdlo

Svrdlo je odabrano na temelju ranijih ispitivanja bušenja kamena, te se kao takvo koristi svrdlo [Slika 49] s tvrdo lemljenom pločicom. Pločica od tvrdog metala izrađena je od volframovog karbida (WC) s 9 % kobaltnim vezivom. Takva pločica ima visoku tvrdoću i čvrstoću i ostvaruje zadovoljavajuću otpornost na trošenje i lom. Svrdlo je promjera 5 milimetara, duljine 75 milimetara uz maksimalnu dubinu obrade od 45 milimetara. Bušenje ne zahtijeva prethodno operaciju zabušivanja zbog oštro brušenog vrha. Svrdlo je modificirano na način izrade kanala koji omogućava ispuhivanje i hlađenje reznih oštrica svrdla tijekom postupka bušenja. Postupak modifikacije rađen je u 2 koraka postupkom elektro - erozije žigom u obliku šipke od grafita. U prvom koraku izrađen je kanal po dužini ([Slika 49] – oznaka 1) svrdla promjera 0,4 milimetara na duljini od 70 milimetara. U drugom koraku izrađen je kanal po širini ([Slika 49] – oznaka 2) svrdla promjera 0,8 milimetara po cijeloj širini svrdla [5].





Slika 49. Ispitno svrdlo [12]

7.3. Režimi obrade

Mjerenja sila rezanja, kao i momenta motora glavnog vretena odrađeno je prilikom bušenja s tri različita posmaka, tri brzine rezanja, tri vrste kamena, tri ponavljajuća mjerenja i tri protoka. Tablica 19 prikazuje osnovne parametre obrade i izračunate režime obrade.

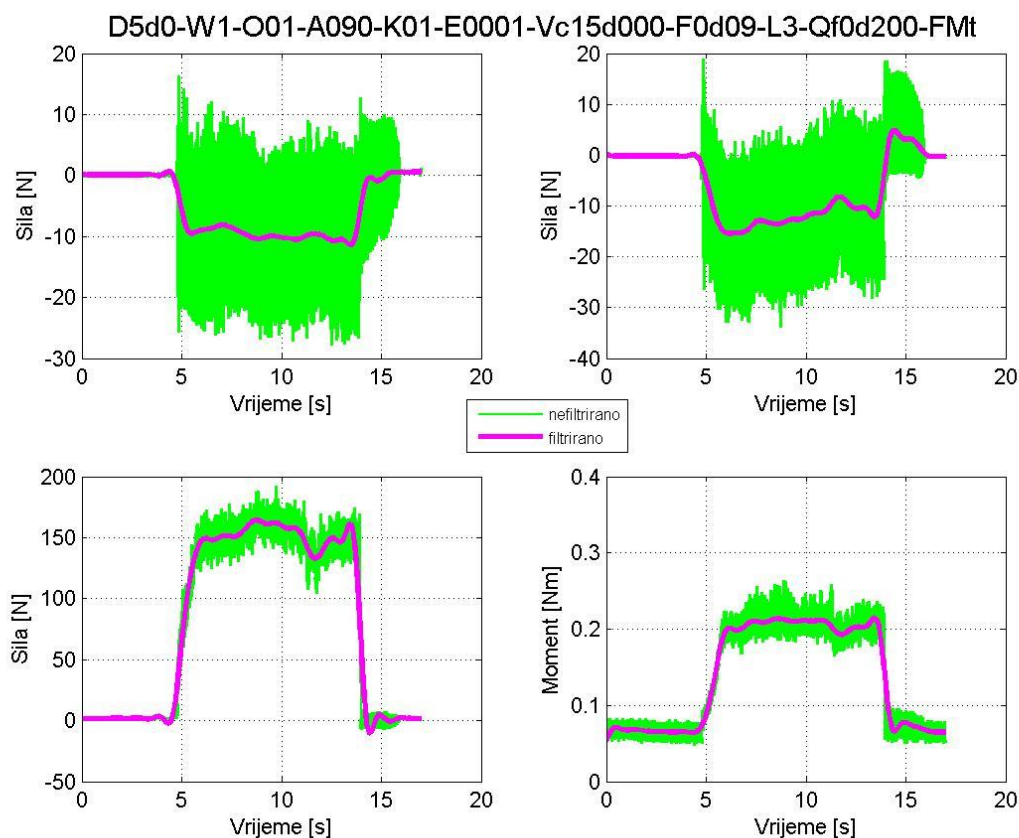
Tablica 19. Početni uvjeti i režimi obrade

Promjer svrdla	Brzina rezanja	Posmak	Učestalost vrtnje GV	Posmična brzina	Dubina bušenja	Vrijeme bušenja
d_A	v_c	f	$n = \frac{v_c}{d_A \cdot \pi}$	$v_f = f \cdot n$	a_p	$t_b = \frac{a_p \cdot 60}{v_f}$
mm	m/min	mm/okr	min^{-1}	mm/min	mm	s
5	10	0,03	636,62	19,11	15	47,10
	15		954,93	28,66		31,40
	20		1273,24	38,22		23,55
	10	0,06	636,62	38,22		23,55
	15		954,93	57,32		15,70
	20		1273,824	76,43		11,78
	10	0,09	636,62	57,32		15,70
	15		954,93	85,99		10,47
	20		1273,24	114,65		7,85

7.4. Probna mjerenja

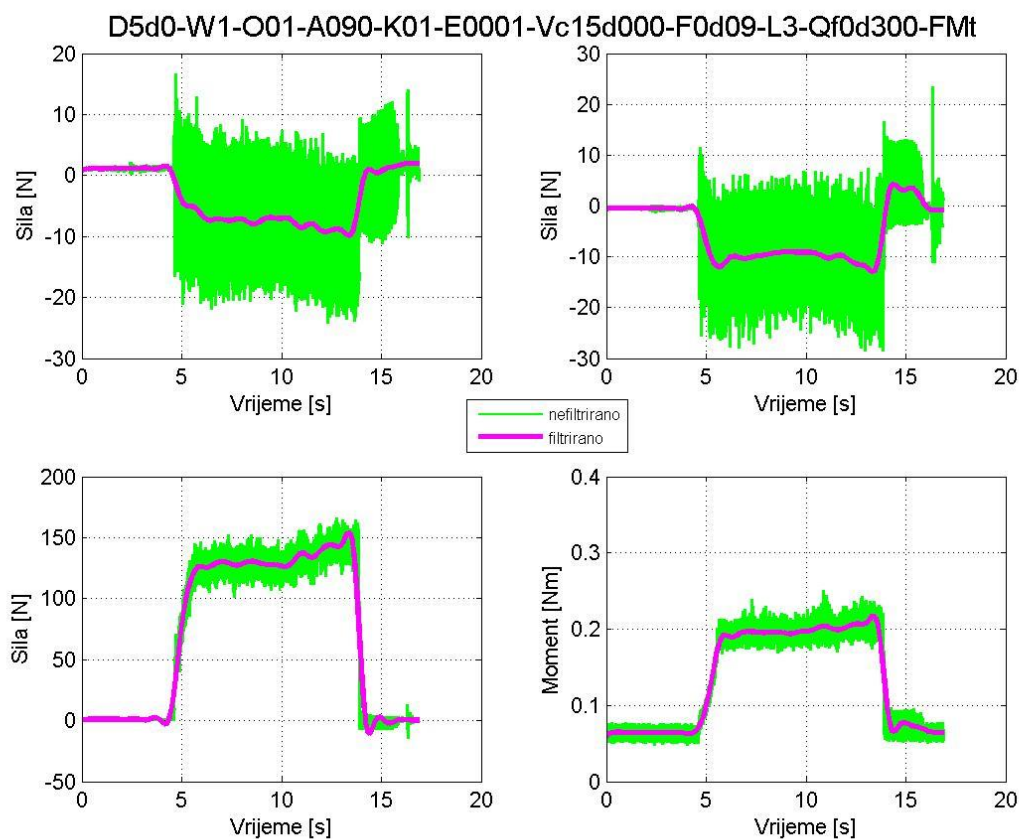
Sveukupno je s ciljem verifikacije i određivanja parametara glavnog eksperimenta izvršeno 81. mjerenje. Kao SHIP korištena je voda, u svrhu određivanja utjecaja na sile rezanja i trošenje alata, tj. svrdla tijekom postupka bušenja. Cilj je odrediti minimalan iznos protoka, pri kojem se odvojena čestica kamena zadovoljavajuće ispire iz zone obrade. Snimani su signali sila i vibracija u sve tri osi (X,Y,Z), akustične emisije i momenta motora glavnog vretena, a potom su signali filtrirani. Prikazani su primjeri dobivenih mjerenih signala prilikom obrade tri provrta, uz oznaku podmazivanja L3, koja označava regulaciju po protoku. Na slikama 50, 51 i 52 gore lijevo nalazi se graf sile F_x , gore desno sila F_y , dolje lijevo F_z i dolje desno moment glavnog vretena M_{gv} . Zelena boja označava sirovi, a roza filtrirani signal.

Prvi provrt [Slika 50] bušen je uz iduće parametre: brzina rezanja $15 \left[\frac{m}{min} \right]$, posmak $0,09 \left[\frac{mm}{okr} \right]$ i protok $0,2 \left[\frac{l}{min} \right]$.



Slika 50. Sile i moment kod prvog bušenja

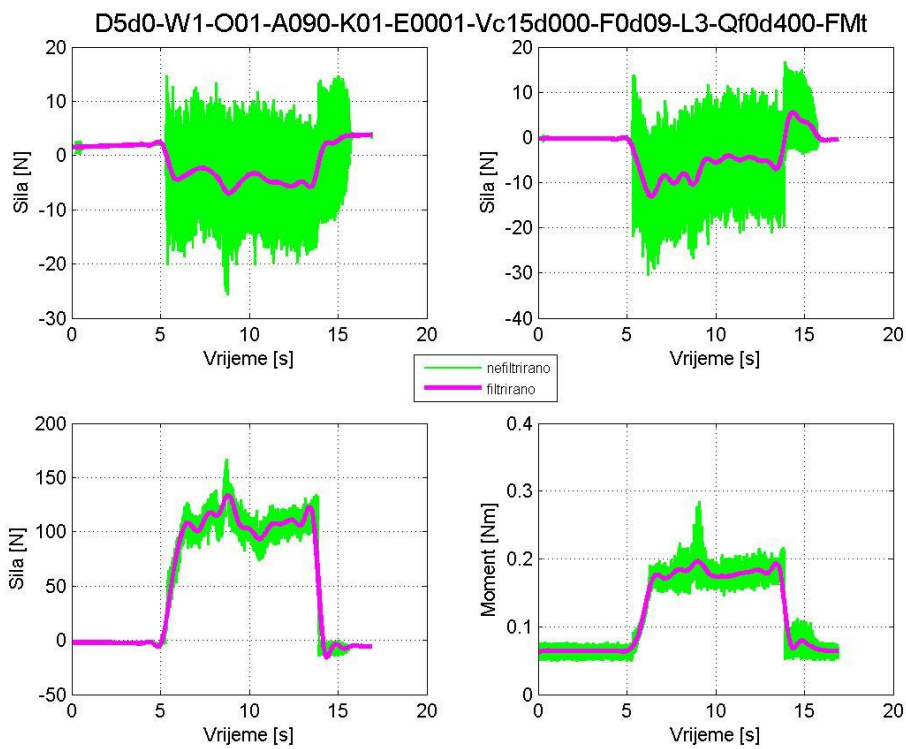
Drugi provrt [Slika 51] bušen je uz iduće parametre: brzina rezanja $15 \left[\frac{m}{min}\right]$, posmak $0,09 \left[\frac{mm}{okr}\right]$ i protok $0,3 \left[\frac{l}{min}\right]$.



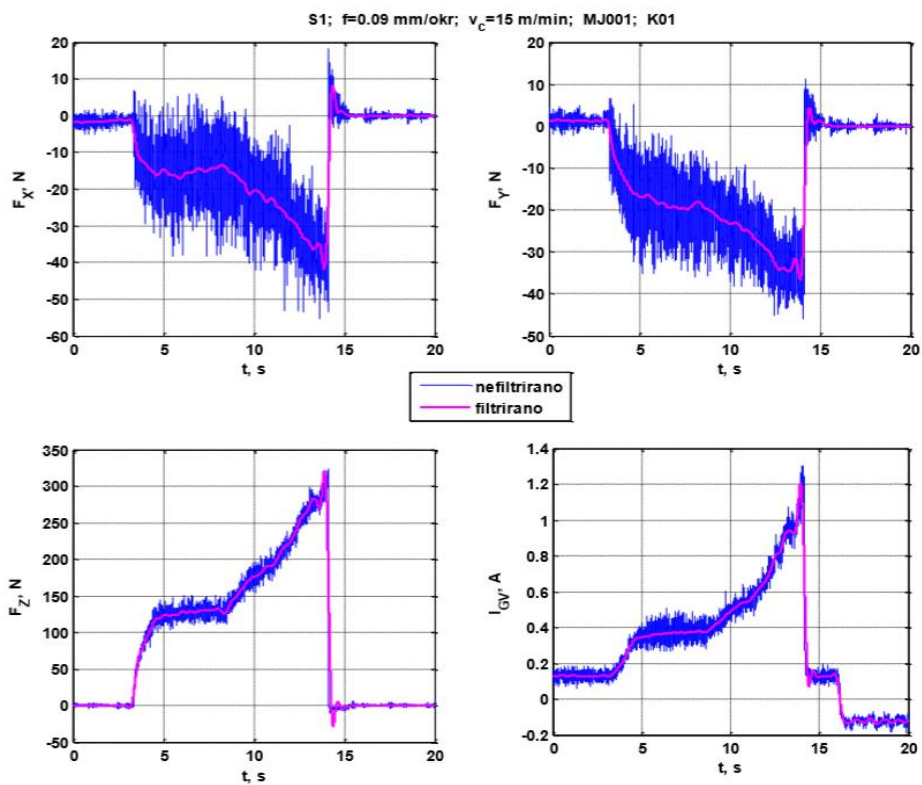
Slika 51. Sile i moment kod drugog bušenja

Treći provrt [Slika 52] bušen je uz iduće parametre: brzina rezanja $15 \left[\frac{m}{min}\right]$, posmak $0,09 \left[\frac{mm}{okr}\right]$ i protok $0,4 \left[\frac{l}{min}\right]$.

Za usporedbu [Slika 53] mogu se vidjeti mjereni signali kod bušenja bez primjene SHIP-a. Gore lijevo nalazi se graf sile F_x , gore desno sila F_y , dolje lijevo F_z i dolje desno struja glavnog vretena I_{gv} . Plava boja označava sirovi, a roza filtrirani signal. Bez primjene SHIP-a dolazi do naglog rasta aksijalne sile bušenja F_z i struje glavnog vretena I_{gv} . Uz iste parametre obrade (posmak, brzina rezanja), oznaka S označava stupanj istrošenosti, MJ oznaku mjerenja i K je oznaka kamena.



Slika 52. Sile i moment kod trećeg bušenja



Slika 53. Sile i struja kod bušenja bez primjene SHIP-a [5]

Do povećanja aksijalne sile dolazi uslijed povećanja posmaka, dok brzina rezanja ima minimalan utjecaj. Može se vidjeti da uz SHIP dolazi do gotovo linearnog povećanja aksijalne sile bušenja F_z i momenta glavnog vretena M_{gv} , te da s povećanjem protoka aksijalna sila i moment padaju. Fz_Max označava 10% najvećih vrijednosti sila, $Fz_Srednje_Interval$ je srednja sila tijekom cijelog postupka bušenja jednog provrta, Mgv_Max označava 10% najvećih vrijednosti momenta motora glavnog vretena i $Mgv_Srednje_Interval$ je srednji moment motora glavnog vretena tijekom cijelog postupka bušenja jednog provrta. Do smanjenja vrijednosti momenta motora glavnog vretena, došlo je zbog smanjenja trenja, jer se odvojena čestica dobro ispirala iz zone obrade.

Tablica 20 prikazuje momente motora glavnog vretena pri različitim protocima. Moment neznatno raste kada je promjena protoka mala ($0,1 \frac{l}{min}$), no može se primijetiti da s povećanjem protoka za $0,2 \frac{l}{min}$, moment glavnog vretena znatno pada.

Tablica 20. Usporedba momenata za različite protoke

Brzina rezanja, m/min	Posmak, mm/okr	Protok, l/min	Mgv_Max, Nm	Mgv_Srednje_Interval, Nm
15	0,09	0,2	0,2066	0,1808
15	0,09	0,3	0,201	0,1863
15	0,09	0,4	0,184	0,1683

Vidljivo je da aksijalna sila bušenja F_z također pada s porastom protoka. Sile u smjerovima X i Y osi imaju neznatan utjecaj na rezultantnu silu bušenja prikazano u tablici 21.

Tablica 21. Usporedba aksijalne i rezultantne sile bušenja za različite protoke

Brzina rezanja, m/min	Posmak, mm/okr	Protok, l/min	Fz_Max, N	Fz_Srednje_Interval, N	FR_Max, N	FR_Srednje_Interval, N
15	0,09	0,2	155,4351	128,6288	156,2195	129,4655
15	0,09	0,3	145,0553	123,9879	145,8412	124,5789
15	0,09	0,4	127,1029	101,1613	127,6683	101,5331

8. ZAKLJUČAK

Dinamika trošenja reznih alata za nehomogene i anizotropne materijale, kao što je kamen, izrazito je nelinearna, te je teško identificirati stupanj istrošenosti. Odvojenu česticu u obliku praha, potrebno je što brže i efikasnije eliminirati iz zone obrade, jer njezino nakupljanje u provrtu povećava sile rezanja, te dolazi do značajnog trošenja svrdla. Kvalitetna procjena istrošenosti svrdla nudi razvoj adaptivnih modela upravljanja, koje sustavima daju autonomnost.

Iz navedenih razloga, u sklopu rada, postojeći eksperimentalni postav nadograđen je modulom za dobavu SHIP-a s mogućnošću regulacije protoka i tlaka različitih medija za hlađenje, ispiranje i podmazivanje. Prilikom izvođenja eksperimenta s navedenim postavom korišten je senzor sila te je sniman moment motora glavnog vretena.

Iz ekonomskih razloga, kao SHIP je korištena voda, a protoci su dovoljni da ispiru odvojene čestice iz zone obrade. U odnosu na komprimirani zrak, voda ima prednost u pogledu hlađenja svrdla, te dodatno reducira istrošenost vrha svrdla. Već probna mjerenja pokazuju korelaciju između protoka i aksijalne sile. Povećanjem protoka reducira se aksijalna sila bušenja. Također je pokazano da brzina rezanja ima minimalan utjecaj na aksijalnu silu, dok posmak značajno utječe.

Buduća istraživanja u području bušenja kamena s prisustvom SHIP-a svakako bi trebalo usmjeriti na više vrsta kamena i različitih režima obrade. Veći protoci nisu ispitivani jer se nisu mogli ostvariti veći tlakovi, te se za daljnja istraživanja preporuča realizacija sustava koji ostvaruje veće tlakove kako bi se ispitao utjecaj većih protoka na aksijalnu silu bušenja. Takav pristup omogućio bi povećanje robusnosti algoritma za procjenu stupnja istrošenosti s ciljem veće robusnosti adaptivno upravljanih alatnih strojeva.

LITERATURA

- [1] Tomislav Bužančić, Klesarstvo i graditeljstvo., 2008.
- [2] http://rgn.hr/~tkorman/nids_tkorman/Kamen/AGKAMEN/poglavlja/agkam02.pdf - pristupljeno 12.03.2019.
- [3] Nikica Torbica, Hram u životu starih Grka.: Essehist : časopis studenata povijesti i drugih društveno-humanističkih znanosti, 2014.
- [4] Hršak, E.: Trošenje alata pri bušenju kamena, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [5] Klaić, M., Indirektni nadzor istrošenosti alata i tvrdoće obratka kod bušenja kamena, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [6] https://bib.irb.hr/datoteka/308456.Primjena_kamena_u_graditeljstvu_Lado_Pletikosi.pdf - pristupljeno 13.03.2019.
- [7] Eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena., 2009.
- [8] <http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/sveucilisni-preddiplomski/inzenjerska-geologija/inzenjerska-geologija-ii-a-dio.pdf> - pristupljeno 14.03.2019.
- [9] http://rgn.hr/~tkorman/nids_tkorman/Strojevi/vjezbe/01Svojstva.ppt - pristupljeno 15.03.2019.
- [10] <http://rgn.hr/~bkave/Materijali/2%20UVOD%20II%20dio.pdf> – pristupljeno 15.03.2019.
- [11] https://www.fsb.unizg.hr/kas/ODIOO/ODIOO%202015/Postupci_obrade_piljenje_blanjanje_i_busenje.pdf - pristupljeno 16.03.2019.
- [12] Fuš, H., Utjecaj odvođenja čestica na aksijalnu silu pri bušenju kamena, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [13] <https://www.eurafco.com/eng/maykestag-hss-eco5-cobalt-stub-drill-din-1897-pz-extra-short-2-20-mm-0090100220100.html> - pristupljeno 16.03.2019.
- [14] Augustin, G., Termičko oštećenje kosti tijekom bušenja dvostupnjevanim svrdlom i svrdlom s protočnim hlađenjem, Doktorski rad, Medicinski fakultet, Zagreb, 2011.
- [15] https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/37266/mod_folder/content/0/ALATI%20I%20NAPRAVE%20-%20Skripta.pdf?forcedownload=1 – pristupljeno 16.03.2019.

- [16] https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/37266/mod_folder/content/0/POSTUPCI%20OBRADE%20ODVAJANJEM%20-%20Skripta.pdf?forcedownload=1 – pristupljeno 17.03.2019.
- [17] Grilec K., Jakovljević S., Marić G.: Tribologija u strojarstvu, Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [18] https://www.fsb.unizg.hr/kas/ODIOO/ODIOO%202015/ODIOO_5.%20PREDAVANJE-2015.pdf – pristupljeno 27.03.2019.
- [19] https://www.fsb.unizg.hr/kas/ODIOO/Trosenje_ooc.pdf – pristupljeno 27.03.2019.
- [20] Udiljak, T., Doprinos razvoju metoda za ispitivanje i praćenje stupnja istrošenosti oštrice reznog alata, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
- [21] https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/37266/mod_folder/content/0/TRIBOLOGIJA%20-%20Skripta.pdf?forcedownload=1 – pristupljeno 27.03.2019.
- [22] Walter titex: Handbook – drilling, 2014.
- [23] Ceratizit: Cutting tools main catalogue
- [24] Ceratizit: Complete range cutting tools, 2016.
- [25] Peček, M., Utjecaj geometrije svrdla i parametara obrade na trošenje oštrice pri bušenju kamena, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [26] http://www.mitsubishicarbide.com/en/technical_information/tec_rotating_tools/drills/tec_drills_technical_top/tec_drilling_wear - pristupljeno 28.03.2019.
- [27] https://e-ucenje.fsb.hr/pluginfile.php/26248/mod_folder/content/0/OBRADA%20ODVAJANJEM%20-%20Skripta.pdf?forcedownload=1 – pristupljeno 30.03.2019.
- [28] Joao Manuel Mimoso, Doria Rodrigues Costa: A new DRMS drilling technique for the laboratory, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisabon, Portugal
- [29] A. Bhatangar, Manoj Khandelwal, K. U. M. Rao: Laboratory investigations for the Role of Flushing Media in Diamond Drilling marble, Roch Mech Rock Eng (2011) – Springer – Verlag (2011) ,03.04.2011.
- [30] Wai Li, Xionghu Zhao, Yufei Li, Yihui Ji, Hui Peng, Lan Liu, Qi Yang: Laboratory investigations on the effects of surfactants on rate of penetration in rotary diamond drilling, College of Petroleum Engineering, State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Changping, Beijing – Journal of Petroleum Science and Engineering, 30.07.2015.

- [31] Brezak D., Staroveški T.: Regulacija obradnih sustava – Predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [32] Klaić M., Staroveški T., Udiljak T.: Tool wear classification using decision trees in stone drilling applications: a preliminary study, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [33] Staroveški, T., Modeliranje trošenja medicinskog svrdla, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [34] Brezak, D. Razvoj hibridnog estimatora trošenja alata i metoda vođenja alatnog stroja, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [35] http://titan.fsb.hr/~jpetric/Predavanja/Pn&Hi_Predavanja%20I%20dio.pdf – pristupljeno 14.04.2019.
- [36] <https://www.ebay.com/itm/K9-Electronic-Water-Flow-Counter-Sensor-0-1L-mim-4-5-L-min-G1-4/253313826481?hash=item3afaee3eb1:g:rwMAAOSw5cNYGG4T> – pristupljeno 14.04.2019.
- [37] https://hobbyking.com/en_us/hxt-10kg-servo-metal-gear-10kg-0-16sec-55g.html?__store=en_us – pristupljeno 15.04.2019.
- [38] <https://www.tinkerforge.com/en/shop/> - pristupljeno 22.04.2019.
- [39] <https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/usb-3.0-monochrome/dmk23ux174/> - pristupljeno 20.04.2019.
- [40] <https://www.opto-e.com/products/matrix-detector-telecentric-lens-model-TC23009> – pristupljeno 20.04.2019.
- [41] http://www.nanokorea.kr/pro03/pro03_light_fiberlight.htm – pristupljeno 20.04.2019.

PRILOG

I. CD-R disc