

# Analiza značajki signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora kod bušenja nehomogenih kamena

---

Vojvodić, Andreja Leonela

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:193094>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Andreja Leonela Vojvodić**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Toma Udiljak, dipl. ing.

Studentica:

Andreja Leonela Vojvodić

Zagreb, 2015.



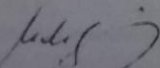
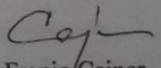
Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Tomi Udiljaku na stručnom vođenju i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem asistentu mag. ing. Mihi Klaiću na savjetima i pristupačnosti tijekom pisanja rada te Katedri za alatne strojeve na pomoći pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Želim se zahvaliti svojim roditeljima što su mi omogućili studiranje i pružali mi podršku. Zahvaljujem se svojim sestrama, prijateljima i kolegama te ostalim dragim ljudima na beskrajnoj podršci, strpljenju i razumijevanju tijekom studiranja.

Andreja Leonela Vojvodić

|   |   |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
|---|---|---|-----------------------|--|-------------------------------------|--|-------|--------|--------|--|----------|--|
|    | <p>SVEUČILIŠTE U ZAGREBU<br/> <b>FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE</b><br/>         Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite<br/>         Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:<br/>         proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo<br/>         materijala i mehatronika i robotika</p>   |  |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| <table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100%;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Sveučilište u Zagrebu</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">Fakultet strojarstva i brodogradnje</td> </tr> <tr> <td style="width: 50%;">Datum</td> <td style="width: 50%;">Prilog</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Klasa:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Ur.broj:</td> </tr> </table> |   |   | Sveučilište u Zagrebu |  | Fakultet strojarstva i brodogradnje |  | Datum | Prilog | Klasa: |  | Ur.broj: |  |
| Sveučilište u Zagrebu   |   |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje   |   |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Datum   | Prilog  |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Klasa:  |   |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Ur.broj:  |   |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| <b>DIPLOMSKI ZADATAK</b>  |   |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Student:  | <b>Andreja Leonela Vojvodić</b>   | Mat. br.: 0035182849  |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Naslov rada na hrvatskom jeziku:  | <b>ANALIZA ZNAČAJKI SIGNALA SILA REZANJA I JAKOSTI STRUJA POGONSKIH MOTORA KOD BUŠENJA NEHOMOGENIH KAMENA</b>   |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Naslov rada na engleskom jeziku:  | <b>CUTTING FORCE AND MOTOR DRVE CURRENT ANALYSIS IN DRILING OF INHOMOGEOUS STONE MATERIALS</b>  |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Opis zadatka:   | <p>Kamen se kroz stoljeća koristio kao osnovni građevni materijal, dok je u novije doba preuzeo dekorativnu i zaštitnu zadaću. Nehomogene strukture, kao i utjecaj fizikalnih i kemijskih svojstava kamena na parametre procesa bušenja predmet su brojnih istraživanja u zadnja dva desetljeća.</p> <p>U radu je potrebno provesti plan pokusa tijekom procesa bušenja, u cilju analize utjecaja tvrdoće kamena na značajke izdvojene iz signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora. Pozornost je također potrebno posvetiti i utjecaju trošenja alata. Plan pokusa je potrebno provesti za oštro i zatupljeno svrdlo na uzorcima kamena veće i manje tvrdoće. Ispitivanja je potrebno provesti na odgovarajućem ispitnom postavu u Laboratoriju za alatne strojeve.</p> |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Zadatak zadan:  | Rok predaje rada:   | Predvideni datum obrane:  |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| 24. rujna 2015.   | 26. studenog 2015.  | 2., 3. i 4. prosinca 2015.  |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| Zadatak zadao:  | Predsjednik Povjerenstva:   |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |
| <br>Prof.dr.sc. Toma Udiljak   | <br>Prof. dr. sc. Franjo Cajner  |   |                       |  |                                     |  |       |        |        |  |          |  |

**Sadržaj:**

|   |      |
|---|------|
| POPIS SLIKA: .....                                    | V    |
| POPIS TABLICA:.....                                   | VII  |
| POPIS OZNAKA: .....                                   | VIII |
| Sažetak: .....  | X    |
| Summary: .....  | XI   |
| 1. UVOD .....   | 1    |
| 2. VRSTE I SVOJSTVA KAMENA .....                      | 3    |
| 2.1. Podjela kamena.....                              | 3    |
| 2.2. Svojstva .....                                   | 5    |
| 2.2.1. Tekstura i struktura.....                      | 5    |
| 2.2.2. Mehanička, kemijska i fizikalna svojstva.....  | 6    |
| 2.2.3. Tehnološka svojstva .....                      | 9    |
| 3. TVRDOĆA.....                                       | 12   |
| 3.1. Definicija tvrdoće .....                         | 12   |
| 3.2. Jednoosna tlačna čvrstoća.....                   | 13   |
| 3.3. Mjerenje tvrdoće.....                            | 14   |
| 3.3.1. Povijesni razvoj mjerenja tvrdoće .....        | 15   |
| 3.3.2. Metoda mjerenja tvrdoće prema Shore-u.....     | 17   |
| 3.3.3. Određivanje tvrdoće prema Schmidt-u.....       | 19   |
| 3.3.4. Metode mjerenja tvrdoće.....                   | 21   |
| 3.3.5. Knoop-ova metoda mjerenja tvrdoće [23].....    | 25   |
| 3.3.6. Norma – određivanje tvrdoće prema Knoop-u..... | 27   |
| 3.3.7. Problemi kod mjerenja tvrdoće .....            | 32   |
| 3.3.8. Nanoutiskivanje.....                           | 33   |
| 4. UTJECAJ TVRDOĆE NA BUŠENJE.....                    | 35   |
| 4.1. Obrada bušenjem .....                            | 35   |
| 4.1.1. Sile i momenti .....                           | 39   |
| 4.1.2. Parametri obrade.....                          | 41   |
| 4.2. Bušivost .....                                   | 43   |
| 4.2.1. Povijesni razvoj mjerenja bušivosti [8].....   | 44   |
| 4.2.2. Geološki utjecaj na bušivost stijena .....     | 45   |
| 5. TROŠENJE ALATA.....                                | 50   |

---

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 5.1.   | Uzroci i mehanizmi trošenja.....                                    | 52 |
| 5.1.1. | Najčešći mehanizmi trošenja.....                                    | 54 |
| 5.2.   | Trošenje svrdla i postojanost alata.....                            | 55 |
| 5.2.1. | Utjecaj parametara obrade na trošenje i postojanost alata [28]..... | 56 |
| 6.     | EKSPERIMENTALNI DIO.....  | 57 |
| 6.1.   | Ispitni postav i mjerni sustav .....                                | 59 |
| 6.1.1. | Snimanje oštrice svrdla .....                                       | 60 |
| 6.2.   | Ciklusi trošenja svrdla i mjerenja istrošenosti .....               | 61 |
| 7.     | ANALIZA REZULTATA.....  | 63 |
| 7.1.   | Rezultati direktnih mjerenja .....                                  | 63 |
| 7.2.   | Rezultati indirektnih mjerenja .....                                | 65 |
| 7.2.1. | Analiza rezultata mjerenja.....                                     | 65 |
| 7.3.   | Mjerenje tvrdoće.....   | 77 |
| 7.3.1. | Vrijednosti izmjerene tvrdoće .....                                 | 77 |
| 8.     | ZAKLJUČAK .....   | 80 |
| 9.     | LITERATURA.....   | 82 |

**POPIS SLIKA:**

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1. Vrste granita .....   | 3  |
| Slika 2.2. Travertin .....   | 4  |
| Slika 2.3. Vrste mramora .....   | 4  |
| Slika 2.4. Homogena tekstura i granularna ili zrnasta struktura .....    | 6  |
| Slika 2.5. Različita djelovanja naprezanja na materijal .....            | 7  |
| Slika 3.1. Veza između jednoosne tlačne čvrstoće i indeksa tvrdoće ..... | 14 |
| Slika 3.2. Shore-ov skleroskop .....                                     | 18 |
| Slika 3.3. Schmidt-ov čekić .....  | 19 |
| Slika 3.4. Upotreba Schmidt-ovog čekića .....                            | 20 |
| Slika 3.5. Geometrija indentora i otiska kod Knoop-ove metode .....      | 25 |
| Slika 3.6. Knoop-ov uređaj i utiskivanje .....                           | 29 |
| Slika 4.1. Bušenje provrta spiralnim svrdlom .....                       | 35 |
| Slika 4.2. Geometrijski parametri spiralnog svrdla .....                 | 36 |
| Slika 4.3. Presjek spiralnog svrdla .....                                | 37 |
| Slika 4.4. Svrdla s različitim kutem zavojnice utora .....               | 32 |
| Slika 4.5. Podjela svrdla prema geometriji oštrice .....                 | 33 |
| Slika 4.6. Sile rezanja u procesu bušenja .....                          | 34 |
| Slika 4.7. Shematski prikaz bušenja spiralnim svrdlom .....              | 35 |
| Slika 4.8. Shematski prikaz brzine rezanja $v_c$ i posmaka $f$ .....     | 37 |
| Slika 4.9. Orijentacija ravnina s obzirom na smjer bušenja.....          | 42 |
| Slika 5.1. Prikaz trošenja alata Tylor-ovom metodom .....                | 44 |



---

|  |    |
|--|----|
| Slika 5.2. Oblici istrošenosti svrdla .....  | 45 |
| Slika 5.3. Mehanizmi trošenja .....  | 46 |
| Slika 6.1. Redoslijed provođenja eksperimenta .....  | 58 |
| Slika 6.2. Troosna numerički upravljana glodalica .....  | 59 |
| Slika 6.3. Senzor sila .....   | 59 |
| Slika 6.4. Nabojno pojačalo .....  | 60 |
| Slika 6.5. Prikaz podataka mjerenja i određivanje parametara obrade .....                                    | 60 |
| Slika 6.6. Snimanje oštrice svrdla .....   | 61 |
| Slika 6.7. Ciklus mjerenja istrošenosti .....  | 61 |
| Slika 6.8. Ciklus trošenja .....   | 62 |
| Slika. 7.1. srednje vrijednosti istrošenosti oštrica „1“ i „2“ .....   | 64 |
| Slika 7.2. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti svrdla na posmičnu silu .....                    | 67 |
| Slika 7.3. Izmjerene vrijednosti struja glavnog motora pri različitim stupnjevima istrošenosti alata .....   | 69 |
| Slika 7.4. Izmjerene vrijednosti struja posmičnog motora pri različitim stupnjevima istrošenosti alata ..... | 71 |
| Slika 7.5. Analiza signala posmične sile, međuovisnost stupnjeva trošenja i vrste kamena.....                | 73 |
| Slika 7.6. Analiza signala struje glavnog motora, međuovisnost stupnjeva trošenja i vrste kamena .....       | 75 |
| Slika 7.7. Analiza signala struje posmičnog motora, međuovisnosti stupnjeva trošenja i vrste kamena .....    | 77 |

**POPIS TABLICA:**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 2.1. Kategorizacija arhitektonskog kamena na temelju tlačne čvrstoće .....     | 8  |
| Tablica 3.1. Prve publikacije o normama za pojedinu metodu u različitim zemljama ..... | 16 |
| Tablica 3.2. Povijesni razvoj metoda mjerenja tvrdoće .....                            | 16 |
| Tablica 3.3. Klasifikacija metoda za mjerenje tvrdoće .....                            | 17 |
| Tablica 3.4. Ispitne sile kod Knoop-ove metode .....                                   | 22 |
| Tablica 3.5. Metode određivanja tvrdoće .....  | 23 |
| Tablica 3.6. Ispitne sile kod Knoop-ove metode .....                                   | 26 |
| Tablica 6.1. Režimi obrade prema odabranim parametrima obrade iz plana pokusa .....    | 57 |
| Tablica 7.1. Početni i konačni oblici trošenja prema stupnju istrošenosti.....         | 64 |
| Tablica 7.2. Područja parametara trošenja s obzirom na stupanj istrošenosti.....       | 65 |
| Tablica 7.3. Vrijednosti tvrdoće u MPa na uzorcima kamena K1 .....                     | 78 |
| Tablica 7.4. Vrijednosti tvrdoće u MPa na uzorcima kamena K2 .....                     | 78 |
| Tablica 7.5. Vrijednosti tvrdoće u MPa na uzorcima kamena K3 .....                     | 78 |
| Tablica 7.6. Rezultati mjerenja tvrdoća K1, K2 i K3 .....                              | 79 |

**POPIS OZNAKA:**

| <b>Oznaka</b>   | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>                           |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------|
| $A_i$           | %               | udio minerala                         |
| $A_{rst}$       | J               | ukupan rad razrušavanja               |
| $a_p$           | mm              | dubina rezanja                        |
| $C_v$           | -               | konstanta ovisna o materijalu obratka |
| $c_k$           | -               | konstanta indentora                   |
| $D, d$          | mm              | promjer svrdla                        |
| $d_k$           | mm              | duljina duže dijagonale utiska        |
| $\Delta V_{dl}$ | kg              | gubitak volumena oštrice dlijeta      |
| $F$             | N               | sila utiskivanja                      |
| $F_a$           | N               | aksijalna sila bušenja                |
| $F_f$           | N               | posmična sila bušenja                 |
| $F_{fp}$        | N               | posmična sila na poprečnoj oštrici    |
| $F_t$           | N               | sila trenja                           |
| $f$             | m/min           | posmak                                |
| $f_z$           | m/min           | posmak za jednu oštricu               |
| $HK$            | MPa             | tvrdoća prema Knoop-u                 |
| $IHI$           | -               | indeks tvrdoće utiskivanjem           |
| $k_{ast}$       | J/kg            | koeficijent abrazivnosti stijene      |
| $k_o$           | -               | koeficijent smanjenja brzine          |
| $L_{\check{c}}$ | m               | duljina izbušene dionice              |
| $m$             | -               | konstanta ovisna o materijalu obratka |
| $M_{Fcp}$       | Nm              | moment izazvan silom $F_{cp}$         |
| $M_{Ft}$        | Nm              | moment izazvan silom $F_t$            |
| $M_u$           | Nm              | ukupni okretni moment                 |

---

|                 |                   |   |
|-----------------|-------------------|---|
| $N, n$          | $\text{min}^{-1}$ | broj okretaja                             |
| $R$             | m/min             | posmak                                    |
| $R_i$           | %                 | Roisswalova abrazivnost                   |
| $S$             | MPa               | čvrstoća kamena                           |
| $T$             | min               | vrijeme trajanja alata                    |
| $t_{\xi}$       | h                 | vrijeme bušenja                           |
| $UCS$           | -                 | jednoosna tlačna čvrstoća                 |
| $v_c$           | m/s               | brzina rezanja                            |
| $v_f$           | m/s               | posmična brzina                           |
| $v_m$           | m/h               | mehanička brzina bušenja                  |
| $z$             | -                 | broj oštrica                              |
| $\alpha, \beta$ | °                 | kutevi između nasuprotnih ploha indentora |

**Sažetak:**

Kamen je jedan od prirodnih materijala koji se svakodnevno koristio od najranijih početaka čovječanstva. Danas se koristi kao građevni materijal, a u većini drugih slučajeva ima dekorativnu i zaštitnu zadaću. Kao i kod drugih materijala, kombinacija mehaničkih, fizičkih, kemijskih svojstava uvjetuju mogućnost obrade i uporabe kamena.

Nemoguće je, zbog njegove heterogene strukture, odrediti točne vrijednosti parametara kojim bi proces obrade bio najučinkovitiji. Tako npr. svrdlo pri bušenju nailazi na nekoliko različitih struktura kamena koje se međusobno razlikuju po svojstvima, posebno tvrdoći i bušivosti. Bušivost ukazuje na lako ili otežano prodiranje svrdla u materijal pa dobra procjena bušivosti rezultira dobrom procjenom tvrdoće obrađivanog materijala. U procesu obrade materijala odvajanjem čestica, rezni dio alata se troši. S obzirom na to, svrdlo je za vrijeme rada podvrgnuto mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima koja uzrokuju promjenu geometrijskog oblika oštrice tj. njezinu istrošenost.

Što veći stupanj automatizacije procesa i predviđeni otpis alata ima svoje prednosti kao što su: smanjenje vremena potrebnog za zamjenu alata i izbjegavanje mogućih oštećenja stroja pri istrošenju alata, što je ujedno i pozitivno s ekonomske strane. Praćenjem stupnja istrošenosti, moguće je isplanirati proces s optimalnom potrošnjom energije, maksimalnim životnim vijekom alata i najvećom produktivnošću te učinkovitošću.

U radu je opisan utjecaj tvrdoće kamena na učinkovitost procesa bušenja i trošenje oštrice svrdla. Cilj pokusa je bio analizirati signale sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora te procijeniti utjecaj tvrdoće na učinkovitost procesa. Uzorci kamena veće ili manje tvrdoće, podvrgnuti su ciklusima trošenja i mjerenja, kako bi se na kraju iz mjerenih vrijednosti tvrdoće procijenilo njihovo međudjelovanje.

Ključne riječi: kamen, tvrdoća, bušenje, trošenje

**Summary:**

Stone is one of the natural materials that are being used from the earliest beginnings of humanity. Today it is used as a building material, and in many cases stone has a decorative and protective role. As it is with other materials, a combination of mechanical, physical and chemical properties condition the ability of stone to process and use.

It is impossible, because of its heterogeneous structure, to determine the correct parameters which make the process of treatment stone most effective. For example, the drill when drilling encounters several stone structures that differ in properties, especially hardness and drillability. Drillability indicates easy or difficult penetration of the drill into the material and a good estimation of drillability results in a good estimation of the materials hardness. When processing materials, the cutting part of the tool is being spent. Given that, the drill during operation is subjected to mechanical, thermal and chemical loads that may change the geometry of the blades.

A higher degree of process automation and provided tool life has its advantages, such as reducing the time required for tool change and to avoid possible machine damage caused by the tool wear. That is also positive from the economic point of view. By monitoring the degree of tool wear, it is possible to schedule a process with optimal power consumption, maximum tool life and highest productivity and efficiency.

This paper describes the influence of rock hardness on the efficiency of the drilling process and tool wear. The aim of the experiment was to analyze signals of cutting forces and motor drive current and evaluate the impact of hardness on the process effectiveness. Samples of stone with different values of hardness were subjected to wear and measurement cycles. In the end, the measured values of hardness were taken into account to evaluate their interaction.

Key words: stone, hardness, drilling, tool wear

## 1. UVOD

Kako bismo nešto izradili odnosno napravili potrebno je imati određeni početni materijal iz čega će nešto nastati. Taj materijal se naziva sirovinom i obrađuje se različitim tehnologijama kojima se postiže konačan željeni oblik. Za sirovine se mogu koristiti i prirodni i umjetni materijali koji su u posljednje vrijeme sve češći u uporabi. Prirodni materijali nalaze se kao gotovi proizvod u prirodi i koristimo ih neprerađene, neznatno doručene ili kao sirovine za daljnju preradu. To su: kamen, pijesak, glina, drvo i dr. Umjetni materijali dobivaju se tehnološkim procesima prerade sirovina, npr: vapno, cement, beton, čelik, staklo, plastične mase.

Znanost koja obuhvaća znanja i vještine u postupcima prerade sirovina u poluproizvode i gotove proizvode zovemo tehnologija (grčki: *tehne* = umijeće; *logos* = znanost). Za npr. građevne materijale to je tehnologija građevnih materijala. Ona se prema vrsti materijala dijeli na: tehnologiju cigle, tehnologiju kamena, tehnologiju betona, tehnologiju plastičnih masa i dr. Valja razlikovati tehnologiju materijala i tehnologiju obrade. Tehnologija materijala proučava porijeklo, građu, kemijski sastav, svojstva, greške, mogućnosti prerade i uporabu materijala, a tehnologija obrade proučava sredstva i načine prerade i obrade materijala pri dobivanju poluproizvoda i gotovih proizvoda te obradu gotovih proizvoda. Pojedini tradicionalni materijali glede svojih dobrih svojstava, koriste se i danas, npr. kamen. Kamen je prema podrijetlu prirodni, prema složenosti jednostavni i prema trajnosti dugotrajan materijal. Kamen je široko primjenjiv materijal, a tehnologija obrade kamena određena je njegovim tehnološkim svojstvima poput tvrdoće, čvrstoće, otpornosti na koroziju i mnogim drugima.

U svim proizvodnim procesima je cilj proizvesti što više komada proizvoda, što veće kvalitete u što kraćem vremenskom roku. Značajke učinkovitosti procesa su pouzdanost korištenje stroja i alata, ekonomična procjena troškova i kvalitetan utrošak vremena. Za dobro konstruiranje procesa bitno je uzeti u obzir sve vanjske i unutarnje utjecajne čimbenike kao i mogućnost automatizacije procesa. Procjena trošenja alata i njegov životni vijek se smatra jednim od najvažnijih problema u automatizaciji procesa u CNC obradi. U današnje se vrijeme, nadzorom procesa obrade, nastoji konstantno pratiti razvoj trošenja oštrice i time unaprijediti učinkovitost procesa. Kako nakon određenog eksploatacijskog vremena alata može doći do njegovog oštećenja, poželjno je unaprijed procijeniti životni vijek alata i u plan procesa

uključiti vrijeme potrebno za njegovu zamjenu. Što veći stupanj automatizacije procesa skraćuje vrijeme zamjene alata te mogućih oštećenih obradaka što je ujedno i pozitivno s ekonomske strane. Praćenjem stupnja istrošenosti, moguće je isplanirati proces s optimalnom potrošnjom energije, maksimalnim životnim vijekom alata i najvećom produktivnošću te učinkovitošću

Danas je kamen prisutan u suvremenom graditeljstvu, u niskogradnji je nezamjenjiv element za donji ustroj prometnica, često se koristi za gradnju građevina sa povijesnim i monumentalnim karakterom poput spomenika i mauzoleja te za rekonstrukciju i konzervaciju vidljivih dijelova povijesnih građevina.



## 2. VRSTE I SVOJSTVA KAMENA

Petrografija je grana petrologije koja se bavi opisom, sustavnom klasifikacijom i raširenošću stijena. Petrografija koristi mikroskopska ispitivanja za opisivanje i klasifikaciju kamena. Točan opis mineralogije, teksture i drugih mikroskopskih značajki kamena, dozvoljava predviđanje njegovih kemijskih, fizičkih i mehaničkih karakteristika. Prikladna praktična podjela, a koja istovremeno dijelom ukazuje na petrografski karakter kamena, odnosi se na njegov postanak, odnosno trajnost njegovog izgleda, obradivost, fizičko- mehanička i kemijska svojstva.

### 2.1. Podjela kamena

Geološki, stijene su podijeljene u tri glavne skupine temeljene na fundamentalnim razlikama u pogledu kako su formirane i onda u nekoliko skupina temeljenih na mineralogiji i teksturi. Osnovne grupe i vrste stijena su: magmatske, sedimentne i metamorfne. [1,2]

Magmatske stijene nastaju hlađenjem i skrućivanjem rastaljene magme. Po svojstvima su tvrde, gustoće  $2100-3300 \text{ kg/m}^3$  i čvrstoće  $100-500 \text{ N/mm}^2$ . Podvrste magmatskih stijena su: granit i gabro, bazalit, sienit, diorit, porfir, andenzit, dijabaz, itd. Granit (slika 1) je vidno zrnata, granulirana magmatska stijena u rasponu boja od roza do svijetlo ili tamno sive i sadrži najviše kvarca popraćenih s jednim ili više tamnih feromagnetskih minerala. Tekstura mu je obično homogena. Bazalt ili plavi kamen je teška, crno obojana vulkanska stijena sastavljena od sitnozrnatog plagioklaza feldspata i feromagnetskih minerala. Trahit je obično blijede boje i sastavljen je pretežno od alkalnih-feldspata i manje feromagnetskih minerala. [1,2]



Slika 2.1. Vrste granita [2]

Sedimentne stijene su nastale trošenjem i taloženjem zemljine kore i fragmenata već postojećih stijena koje su raskomadane erozijom, organskih otpada kao što su ljuške i ostaci koralja ili materijala otopljenih u površinskim vodama ili podzemnim vodama. Riječ je o

mekim stijenama gustoće 2000-2700 kg/m<sup>3</sup> i čvrstoće 50-160 N/mm<sup>2</sup>. Podvrste su: vapnenac, pješčenjak, travertin (slika 2), drobljenik, šljunak, dolomit, sadrovac, tupina. Pješčenjak je sedimentna stijena sastavljena uglavnom od minerala i fragmenata s rasponom veličine pijeska od 2 do 0,06 mm i imaju minimalno 60% slobodnog silicija, cementiran ili vezan u većoj ili manjoj mjeri od raznih materijala, željezovog oksida, karbonata ili gline. Kvarcni pješčenjak sadrži najmanje 90% slobodnog silicija, zrna kvarca i silikatni cement te ima tlačnu čvrstoću preko 69 MPa. Vapnenac je stijena sedimentnog podrijetla sastavljena uglavnom od minerala kalcita i dolomita, ili od kombinacije ta dva minerala. [1,2]



Slika 2.2. Travertin [2]

Metamorfne stijene nastaju promjenom svojstava već postojećih stijena, eruptivnih i sedimentnih koje su podvrgnute povećanju temperature ili tlaka, ili oboje tako da prolaze proces rekristalizacije. Pripadaju skupini tvrdih i srednje tvrdih stijena s gustoćom 2500-2900 kg/m<sup>3</sup>. Podvrste metamorfnih stijena su mramor, škrljevac, serpentin, gnajs i sl. Mramor (slika 3) je metamorfni vapnenac koji se može polirati i pokazuje rekristaliziranu isprepletenu teksturu sastojajući se uglavnom od karbonata minerala kalcita i/ili dolomita. Škrljac je mikrokristalna metamorfna stijena koja se obično sastoji od škrljevca, tinjca, klora i kvarca. Tinjčevi minerali imaju subparalelnu orijentaciju što daje veliku rascjepivost stijene, što omogućuje da je se rascijepi u tanke, ali tvrde listove. Kvarcit je vrlo stvrdnut, obično metamorfni pješčenjak koji sadrži najmanje 95% slobodnog silicija s tlačnom čvrstoćom preko 117 MPa. [1,2]



Slika 2.3. Vrste mramora [2]

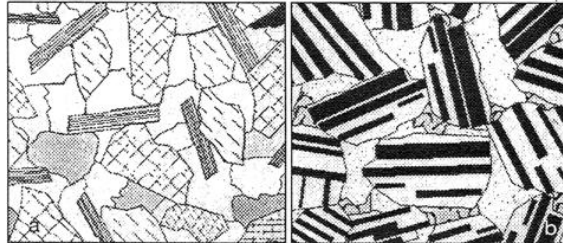
Ovisno o primjeni i uvjetima u kojima će se nalaziti, pored vizualnih estetskih svojstava, nužno je da kamen zadovolji propisane zahtjeve za bitna fizička i mehanička svojstva. Obzirom na uobičajene primjene prirodnog kamena kao oblikovnog i konstruktivnog elementa, najčešće se zahtijeva poznavanje tlačne čvrstoće, čvrstoće na savijanje, otpornosti na habanje, postojanosti prema kemijski agresivnim tvarima te poznavanje termičkih svojstava kamena.

## **2.2. Svojstva**

Prema usvojenoj europskoj normi: Metode ispitivanja prirodnoga kamena -Petrografsko ispitivanje (HRN EN 12407:2000) petrografske odlike prirodnog kamena opisuju se makroskopski i mikroskopski. Makroskopski opis prirodnog kamena obuhvaća: boju, veličinu zrna, makroskopski vidljive pukotine i šupljine, itd. Mikroskopski opis prirodnog kamena obuhvaća: teksturu i strukturu kamena, sastojke, minerale, osnovnu masu, diskontinuitete. Minerali, sastojci stijena i kamena, homogena su prirodna tijela s pravilnim rasporedom atoma ili iona u prostornoj kristalnoj rešetki. Stalnoga su kemijskog sastava i određenih fizikalnih svojstava. U prirodi ih rijetko nalazimo kao samorodne elemente (npr. ugljik kao grafit i dijamant). Redovito su to kemijski spojevi. Minerali koji su bitni sastojci stijena nazivaju se petrogeni ili stjenoviti minerali. [3]

### **2.2.1. Tekstura i struktura**

Pod teksturom kamena podrazumijevamo međusobne odnose sastojaka u kamenu te njihov prostorni raspored i orijentaciju. Glavne tekture kamena su homogena, fluidalna, slojevita i škriljava. Homogena tekstura je ona kod koje su sastojci ravnomjerno raspoređeni u kamenu, bez bilo kakve naglašene prostorne orijentacije. Takvom teksturom se odlikuje većina stijena eruptivnog postanka te neke vrste sedimentnog i metamorfnog postanka (slika 4). Fluidalnu teksturu odlikuju paralelno i subparalelno poredani mineralni sastojci osnovne mase stijene koji su posljedica toka lave. Slojevita tekstura je temeljna značajka sedimentnih stijena, a slojevitost može biti izražena nizanjem međuslojnih ploha, finim lameliranjem, promjenama veličine sastojaka u pojedinim slojevima, paralelnim i subparalelnim redanjem pločastih i listićavih sastojaka. Metamorfne stijene odlikuje škriljava tekstura s paralelno do subparalelno raspoređenim pločastim i listićavim mineralima. [3]



Slika 2.4. Homogena tekstura i granularna ili zrnasta struktura [3]

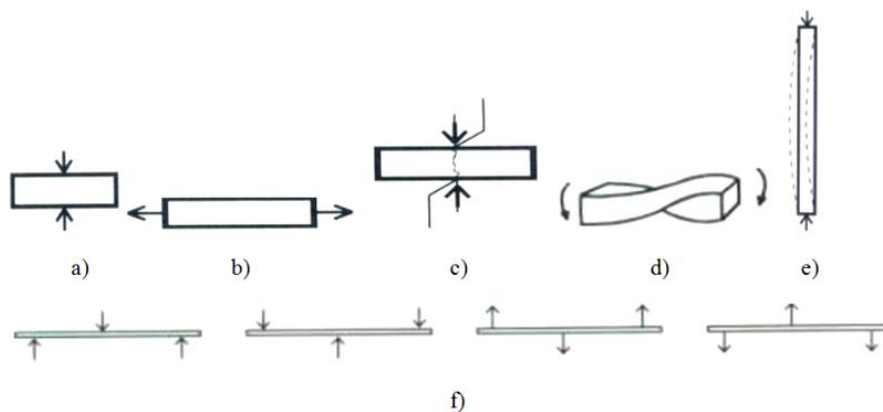
Struktura kamena podrazumijeva oblik pojedinih minerala u kamenu i njihovu veličinu. Ovisno o postanku stijena, glavne strukture se međusobno razlikuju s obzirom na veličinu minerala, njihov međusobni raspored i povezanost. Glavne strukture kamena eruptivnog postanka su granularna ili zrnasta, intersertalna i porfiroidna; sedimentnog postanka klastična, organodetritarna i kristalasta. Glavne strukture kamena metamorfnog postanka su granoblastična, lepidoblastična, nematoblastična, porfiroblastična, itd. [3]

### 2.2.2. Mehanička, kemijska i fizikalna svojstva

Kamen je proizvod prirode i ima svoje jedinstvene radne značajke. Njegova fizička svojstva uključujući boju, zrna i teksturu mogu biti jako različita i unutar serije kamenih uzoraka. Ispitivanje kamena koristi se da se ustanove svojstva kamena i njihov utjecaj na ponašanje kamena kada se nalazi pod različitim opterećenjima, utjecajem vlage, abrazije ili termičkih ciklusa. Kako god, korisne informacije se mogu jedino dobiti kroz reprezentativne uzorke i njihovom točnom i opreznom pripremom. Karakteristične promjene u svojstvima kamena mogu zahtijevati dodatne uzorke za neka ispitivanja da se dobiju pouzdani podaci. [1]

Mehanička svojstva građevnih materijala su svojstva glede djelovanja vanjskih sila na materijal. Sve vanjske sile, koje djeluju na neko tijelo, predstavljaju opterećenje. Opterećenje može biti trajno ili statičko i povremeno, udarno ili dinamičko. Zbog opterećenja tijelo mijenja oblik. Ako je promjena oblika privremena, odnosno javlja se samo dok djeluju sile, nazivamo je elastičnom deformacijom, a ako je promjena trajna, postojana i nakon prestanka djelovanja opterećenja, riječ je o trajnoj deformaciji. Mehanička svojstva su: čvrstoća, tvrdoća, elastičnost, žilavost. Čvrstoća je otpornost materijala na razna naprezanja: tlak, vlak, odrez, savijanje, izvijanje i sukanje. Jedinica čvrstoće je  $N/m^2$ . Tlačno naprezanje (slika 5a) nastaje kada sile djeluju jedna prema drugoj i nastoje tijelo stanjiti, zbiti ili zgnječiti. Vlačno naprezanje (slika 5b) je stanje naprezanja u kojemu sile djeluju jedna od druge i nastoje tijelo rastegnuti, izdužiti ili u krajnjem slučaju raskinuti. Odrez (slika 5c) se odnosi na suprotne sile

koje djeluju okomito na os tijela, guraju materijal u suprotnim smjerovima na vrlo bliskim razmacima i nastoje ga presjeći. Savijanje (slika 5f) se javlja kada tri sile djeluju okomito na os tijela, tlačno ili vlačno. Unutarnja sila djeluje suprotno od onih krajnjih, a tijelo se savija u smjeru djelovanja veće sile. Kod izvijanja (slika 5e) sile djeluju jedna prema drugoj, u smjeru osi tijela razmjerno velike visine ili duljine u odnosu na širinu. Tijelo se savija okomito na smjer djelovanja sile, tj. izvija se. Sukanje (slika 5d) je stanje naprezanja kod kojega je sustav sila na jednom kraju tijela suprotan sustavu sila na drugom kraju, tako da nastoje materijal usukati. [4]



Slika 2.5. Različita djelovanja naprezanja na materijal [4]

Elastičnost je svojstvo materijala da se poslije djelovanja vanjskih sila vrati u prvobitni oblik (opruga, čelično uže visećeg mosta i sl.). Svojstvo suprotno elastičnosti je plastičnost, kada se tijelo prestankom djelovanja sila ne vraća u prvobitni oblik (npr. glina). Youngov modul elastičnosti je još jedno važno svojstvo prirodnog kamena jer mjeri elastičnost kamena. Mjeri količinu naprezanja kojim se može opteretiti kamen prije nego se deformira i izražava se u gigapaskalima [GPa]. Većina prirodnog kamena ima Youngov modul oko 50 GPa. Žilavost je svojstvo materijala da izdrži određeni broj presavijanja iznad granice elastičnosti prije nego što pukne, npr. višekратно savijanje i ravnanje armature. Svojstva suprotna žilavosti su krhkost i lomljivost. [4,5]

Kemijska svojstva se odnose na bitne promjene materijala, tj. promjene kemijskog sastava. U kemijska svojstva ubrajamo: kemijski sastav, sposobnost kemijskog razlaganja, spajanja i kemijsku postojanost. Kemijsko razlaganje je rastavljanje složenih sastojaka na jednostavnije, da bi se dobili pogodni građevni materijali, dok se kemijskim spajanjem odnosno sintezom više materijala dobiva novi materijal. Kemijska postojanost je postojanost pri dodiru raznih materijala. Kemijski postojani materijali su trajniji od nepostojanih. Za pravilnu uporabu

građevnog materijala potrebno je znati koji se materijali smiju miješati i u kojoj mjeri, a da ne dođe do razaranja i uništenja materijala. [4,5]

Fizikalna svojstva se odnose na promjene materijala pri kojima se mijenja oblik, ali ne i kemijski sastav. Fizikalna svojstva minerala važna su za međusobno razlikovanje minerala, ali i njihovog utjecaja na svojstva mineralnog agregata odnosno kamena. Bitna svojstva minerala su: boja, sjaj, oblik, tvrdoća, kalavost, gustoća i toplinsko širenje. Neka od najvažnijih fizikalnih svojstava kamena koja utječu na njegovu obradivost, a time i primjenu su npr. tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje te otpornost na habanje. Tlačna čvrstoća jednaka je aksijalnom opterećenju probnog uzorka, kocke ili valjka po jedinici površine kod kojeg nastaje plastična deformacija i lom. Ispituje se na suhim uzorcima kamena. Prema vrijednostima tlačne čvrstoće, arhitektonski kamen se može klasificirati u pet skupina prema tablici 2.1. Čvrstoća na savijanje predstavlja razarajuću deformaciju do koje dolazi djelovanjem sile normalno na os probnog uzorka kamena oslonjenog na dva oslonca. Otpornost na habanje se odnosi na otpornost koju kamen pruža prema abraziji struganjem. S druge strane, svojstva poput boje i površinske obrade kamena predstavljaju odlučujuće estetske činitelje pri izboru kamena. [4,5]

Tablica 2.1. Kategorizacija arhitektonskog kamena na temelju tlačne čvrstoće [4]

| Kategorija čvrstoće | Tlačna čvrstoća, [MPa] |
|---------------------|------------------------|
| vrlo niska          | < 40                   |
| niska               | 40 – 80                |
| srednje niska       | 80 – 180               |
| visoka              | 180 – 280              |
| vrlo visoka         | > 280                  |

Fizikalna svojstva stijena su se proučavala oduvijek, a najvažnije otkriće bilo je da ovise o njihovoj mikrostrukturi. Willard i Mc Williams su 1969. ustanovili da mikrostruktura, uključujući cijepanje minerala, veličinu zrna i mikropukotine, imaju utjecaj na tvrdoću stijena i smjer grešaka odnosno razvoj pukotina. 1970. godine Merriam pronalazi dobru vezu između čvrstoće granita i sadržaja kvarca. Onodera i Asoka Kumara, 1980. utvrđuju da se čvrstoća eruptivnih stijena smanjuje linearno s povećanjem veličine zrna. Irfan, 1996. ukazuje na to da su fizička svojstva netaknutih stijena uvelike pod utjecajem vrste, teksture i postotka minerala koji formiraju stijenu. [6]

Jedno od najvažnijih petrofizikalnih svojstava stijena je njihova poroznost. Poroznost obuhvaća porni ili slobodni prostor unutar stijene i odraz je taložnih uvjeta u kojima je ona nastala. Poroznost je izravno posljedica načina pakiranja ili slaganja mineralnih zrna u stijeni. S poroznosti je usko povezano svojstvo apsorpcije vode. Prirodno kamenje ne upija tekućinu, ali svaki kamen ima različito svojstvo apsorpcije vode. Apsorpcija vode je udio vode koju može apsorbirati kamen pod određenim uvjetima uranjanja. Mjeri se povećanje težine kamena uronjenog u vodu, na određenoj temperaturi, u određenom vremenu. Tako na primjer, apsorpcija granita iznosi 0,1 - 1%, dok je mramora do 3%. Poroznost i apsorpcija vode uglavnom ovise o strukturi i izgledu zrna minerala pa tako i rasporedu pora. Međutim, treba biti oprezan i pri izradi ispitnih uzoraka jer se npr. toplinskim procesima produžuju mikropukotine što izravno povećava apsorpcijsku sposobnost. [1]

### 2.2.3. Tehnološka svojstva

Tehnološka svojstva su kombinacija kemijsko-fizičko-mehaničkih svojstava koja daju pogodnost za određenu vrstu prerade materijala. Najveći utjecaj na bušenje kamena imaju svojstva: tvrdoća, abrazivnost, bušivost i konsolidarnost. [7]

Tvrdoća je prema općenitoj definiciji sposobnost stijena da se opiru prodoru nekog drugog, znatno tvrdog tijela u nju. Najčešće se taj pojam povezuje s grebanjem jednog materijala drugim, tvrdim materijalom ili utiskivanjem tvrdog materijala u materijal manje tvrdoće. Tvrdoća je prema nekim autorima jedan vid čvrstoće tj. čvrstoća na utiskivanje, dok je prema drugima čvrstoća naprezanje koje uzrokuje lom uzorka, a tvrdoća pokazatelj lokalnog naprezanja koje uzrokuje stvaranje kratera ili otiska u stijeni. Tvrdoća se može definirati na način da je to otpor stijene djelovanju koncentriranih sila koje uzrokuju lokalni otisak ili krater, dok cjelina stijene ostaje nenarušena. Pri jednostavnom utiskivanju ili udarcu oštrice dljetca, u stijeni nastaje otisak tako što se određeni volumen istisne iz stijene, dok u krhkoj stijeni nastaje krater drobljenjem određenog volumena stijene koji se odcijepi. [7]

Abrazivnost je pokazatelj sposobnosti površinskog sloja stijene da se aktivno opire razrušavanju, tj. sposobnost stijene da zatupljuje oštrice svrdla. Abrazivnost stijene je veoma važan čimbenik kod bušenja, pošto utječe na trajanje svrdla i mehaničku brzinu bušenja. Jako izražena abrazivna svojstva imaju stijene koje sadrže zrnca vrlo tvrdih minerala koja su povezana manje čvrstim vezivom. Najabrazivnijim se smatraju kvarcni pješčenjaci. Iskustvo

pokazuje da, u načelu, u šupljikavim i raspucanim stijenama abrazivnost raste. Pokazatelj abrazivnosti stijene je koeficijent abrazivnosti izražen formulom: [7]

$$k_{ast} = \frac{A_{rst}}{\Delta V_{dl}} \quad [J/kg] \quad \text{gdje su:} \quad \begin{array}{l} k_{ast} - \text{koeficijent abrazivnosti stijene [J/kg]} \\ A_{rst} - \text{ukupni rad uložen u razrušavanje stijene [J]} \\ \Delta V_{dl} - \text{gubitak volumena oštrice dlijeta [kg]} \end{array}$$

Bušivost stijene je dogovorni, kompleksni pokazatelj međuovisnosti geoloških i mehaničkih svojstava stijene koja se pri određenim tehničkim i tehnološkim parametrima očituje u mehaničkoj brzini bušenja. Točniji naziv ovog pokazatelja je podatljivost stijene bušenju. Osnovni pokazatelj bušivosti je mehanička brzina bušenja:

$$v_m = \frac{L_{\xi}}{t_{\xi}}, [m/h] \quad \text{gdje su:} \quad \begin{array}{l} L_{\xi} - \text{duljina izbušene dionice [m]} \\ t_{\xi} - \text{vrijeme čistog bušenja [h]} \end{array}$$

Bušivost stijene je izuzetno važan pokazatelj koji ima višestruku funkciju. S jedne strane, pri bušenju određene stijene, koja ima konstantna geološka i mehanička svojstva, mehanička brzina bušenja promijenit će se pri promjeni bilo kojeg od tehnoloških parametara bušenja. Tijekom bušenja pri konstantnim vrijednostima tehnoloških parametara, promjena mehaničke brzine bušenja ukazuje na promjenu geoloških i mehaničkih svojstava stijene. Mehanička brzina bušenja ovisi o smjeru bušenja s obzirom na slojevitost stijene. U pravilu, mehanička brzina pri bušenju okomito na slojevitost  $v_{mok}$  je najveća, dok je njena vrijednost pri bušenju duž slojevitosti  $v_{mpa}$  najmanja. Pri bušenju sloja pod nekim kutem između  $90^\circ$  i  $0^\circ$ , vrijednost mehaničke brzine bušenja bit će između maksimalne i minimalne vrijednosti. [7]

Konsolidiranost stijena je vrlo važan pokazatelj koji kod izrade bušotina pokazuje stabilnost stijenki bušotine. Taj pojam je specifičan, kao i prethodno opisani pojam bušivosti. Dakle, uvjetno definiran pojam koji ukazuje koliko vremena se mogu obavljati radovi u bušotini prije nego što nastanu komplikacije u bušotini zbog zarušavanja stijenki bušotine. Stabilnost stijene se definira kao sposobnost stijene koja čini stijenku kanala bušotine da se ne obrušava nakon njenog raskrivanja. [7]

Navedeno je i objašnjeno samo nekoliko najvažnijih svojstava stijena. Prije svakog postupka obrade bitno je uzeti u obzir ona svojstva koja utječu na samu operaciju, bilo to bušenje, glodanje, tokarenje i sl. Kako je u ovom radu pozornost posvećena posebno tvrdoći i bušivosti kamena, važno je znati u kakvom su međusobnom odnosu s drugim svojstvima. Tako na primjer, struktura utječe na svojstvo tvrdoće o kojoj pak ovisi bušivost i obradljivost kamena.



Mnoga svojstva kamena ovise o njegovoj strukturi. Geološki meke i tvrde strukture su uglavnom uvjetovane stupnjem cementiranja pa tako npr. cementirani kvarcni pješčenjaci imaju veću tvrdoću od slabije cementiranih pješčenjaka. Stijene koje se sastoje od kalcita ili drugih karbonata su meke. Mineralni sastav također utječe na tvrdoću kamena pa je tako čisti kvarcni pješčenjak tvrdi od onoga koji sadrži glinu u sebi. Bušenje tvrdih i jako tvrdih, obično i abrazivnih struktura uzrokuje teško riješive probleme u industriji bušenja usprkos dokazanom razvoju i poboljšanjima alata, opreme, strojeva i tehnika bušenja. [8]

### 3. TVRDOĆA

Različite obrade materijala zahtijevaju pridavanje pozornosti različitim svojstvima obrađivanog materijala, ovisno o tome što najviše utječe na samu učinkovitost procesa. Kod obrade kamena možemo reći da je jedno od tih najutjecajnijih svojstava upravo njegova tvrdoća. Kao što je već navedeno, tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatnije tvrdog tijela. Postoje različite definicije i objašnjenja utjecaja tvrdoće na proces obrade, ali sve se u konačnici svodi na iste zaključke.

#### 3.1. Definicija tvrdoće

Tvrdoća je svojstvo čvrstih tvari. Čvrste tvari su tvari u krutom agregatnom stanju, a prepoznatljive su po svojstvima opiranja promjenama oblika i obujma. Tvrdoća minerala ili kamena je otpornost na trajnu deformaciju i zbog toga važan faktor za ocjenjivanje obradivosti kamena u kamenolomu i mlinu te njegova otpornost na mehanička trošenja. Tvrdoća je dosljedna na površini svježih minerala te se može mjeriti i na terenu i u laboratoriju. Razlikujemo osnovne vrste tvrdoće: tvrdoću na grebanje, tvrdoću utiskivanjem, tvrdoću habanja, tvrdoću odskoka i tvrdoću na udar. Velika složenost strukture kamena ne dopušta usku korelaciju različitih čvrstoća i parametara tvrdoće. [9]

Doslovna definicija tvrdoće je da je tvrdoća stanje ili obilježje materijala da je tvrd. Tvrdoća mjeri koliko su atomi unutar materijala međusobno povezani. Tvrdoća materijala je njegova sposobnost da se odupre trajnoj plastičnoj deformaciji. Ovisno o kontekstu u kojem se nalazi, također se može opisati i kao otpornost na elastičnu deformaciju kod elastomera ili otpornost na stvaranje žljebova ili utora pri grebanju. Pojam tvrdoće se može odnositi i na otpornost na savijanje, abraziju ili rezanje. Međutim, suvremena definicija tvrdi da je tvrdoća svojstvo materijala koje mu omogućuje da se suprostavi plastičnoj deformaciji koju izaziva relativno jak i tvrd indentor pravilno definirane geometrije. Prihvaćeno je da je tvrdoća mjera otpora kristalne rešetke gibanju dislokacija. Također, kemijske sile u kristalima se odupiru gibanju dislokacija koje je povezano s razmiještanjem atoma unutar rešetke. Taj otpor se naziva unutarnjom tvrdoćom kristala. [10]

Izuzetno je važno razlikovati tvrdoću stijene i tvrdoću pojedinih minerala koji čine stijenu. To ima veliki značaj prvenstveno pri laboratorijskom određivanju tvrdoće jer mjerenje na maloj površini ne obuhvaća nejednorodnu površinu. Tako se kod određivanja tvrdoće stijena

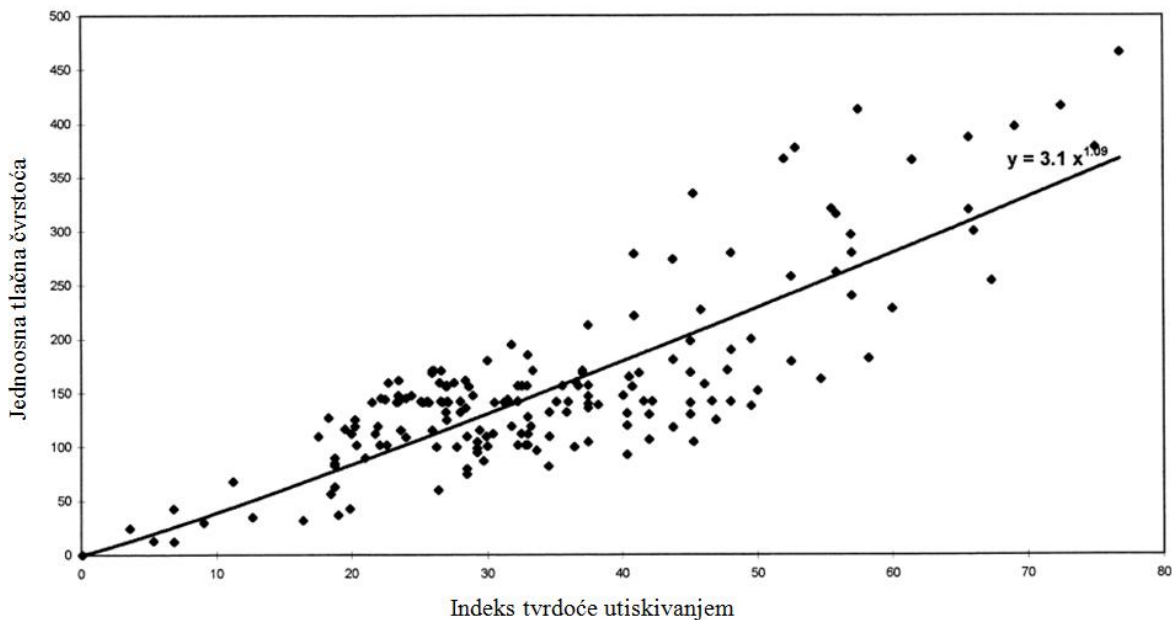
koriste različite metode te se i dobiveni rezultati međusobno razlikuju. Neke od šire prihvaćenih metoda za određivanje tvrdoće stijena su: metoda po Shore-u, Schmidt-u, Brinell-u, Pfaff-u, Vickers-u, Knoop-u, Rockwell-u. [7]

### 3.2. Jednoosna tlačna čvrstoća

Najrašireniji parametar u projektiranju gdje se koristi kamen je jednoosna tlačna čvrstoća, UCS (*uniaxial compressive strength*). Jednoosna tlačna čvrstoća je najveće tlačno naprezanje koje materijal može podnijeti u jednom smjeru prije nastanka loma. Tlačna čvrstoća je zapravo jedno od najvažnijih svojstava kojim se može predvidjeti ponašanje materijala pri njegovoj obradi.

Mnogi znanstvenici smatraju tlačnu čvrstoću važnijim svojstvom od tvrdoće. Međusobno su u uskoj korelaciji i možemo reći da u nekoj mjeri na isti način opisuju svojstva i ponašanje materijala. Međutim ispitivanje tlačne čvrstoće je skuplje i dugotrajnije tako da se ona ipak pokušava izraziti preko tvrdoće. Standardna UCS ispitivanja daju zadovoljavajuće rezultate u uvjetima gdje ispitivani uzorak nema slabih ravnina, diskontinuiteta i mikropukotina. Međutim, potreba za preciznom pripremom uzoraka i teška oprema za ispitivanje čine UCS ispitivanja skupima i dugotrajnima. Predlaže se standardnim testom utiskivanjem ispitati tvrdoću i onda na osnovu nje ocijeniti jednoosnu tlačnu čvrstoću. Postupak utiskivanja se također može koristiti i za neovisnu procjenu drugih svojstava poput bušivosti i rezljivosti kamena. Jednostavnost postupka leži u tome da se svojstva mogu ispitivati u bilo kojem smjeru i orijentaciji s obzirom na ispitnu opremu. Ispitivanja utiskivanjem imaju manje stroge zahtjeve na pripremu uzoraka i oprema može biti manje sofisticirana. Stoga su takva ispitivanja mnogo jednostavnija, brža i ekonomičnija za provedbu od npr. standardnog UCS ispitivanja. [11]

Rezultat mjerenja tvrdoće utiskivanjem je tzv. index tvrdoće utiskivanjem, IHI (*indentation hardness index*). IHI indeks se izračunava kao kvocijent maksimalno primijenjenog opterećenja i promjera svrdla. Obje vrijednosti, i UCS i IHI su pokazatelji otpornosti kamena na elasto-plastične deformacije. Međusobno su otprilike proporcionalne što je prikazano na slici 3.1. [11]



Slika 3.1. Veza između jednoosne tlačne čvrstoće i indeksa tvrdoće [11]

Eksponencijalna jednaždba pravca glasi:

$$UCS = 3,1 \cdot IHI^{1,09}$$

Predviđeno je da se bolja povezanost između UCS i IHI vrijednosti može dobiti ako se IHI indeks izračunava kao tangencijalna vrijednost opterećenja, nego kao prosječna. [11]

### 3.3. Mjerenje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće je vjerojatno najčešće uporabljeno ispitivanje na području mehaničkih svojstava materijala, unatoč tome što mehanička svojstva utvrđena ispitivanjem tvrdoće nisu fizikalno jednoznačno definirane veličine. Ispitivanje tvrdoće tek neznatno oštećuje površinu ispitivanog predmeta pa se općenito može svrstati među nerazorna ispitivanja. Osnovni princip mjerenja kod većine metoda je mjerenje veličine ili dubine otiska što ga indenter, opterećen nekom silom, načini u ispitivanom materijalu. Podatak o tvrdoći u međuostalom je pokazatelj strojne obradljivosti materijala. Tvrdi materijali se u principu teže obrađuju, a mekši lakše.

Unatoč tome što tvrdoća ne predstavlja fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo, mjerenje tvrdoće je jedan od najraširenijih postupaka na području određivanja mehaničkih svojstava materijala. Razlog tome je s jedne strane, što je tvrdoća u korelaciji s nekim drugim mehaničkim svojstvima (npr. vlačnom čvrstoćom), a s druge strane mjerenje tvrdoće je

jednostavnije i prije svega brže od ispitivanja nekih drugih mehaničkih značajki. Nadalje, za mjerenje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni ispitni uzorci već je mjerenje moguće, ovisno o metodi, na poluproizvodima ili čak gotovim proizvodima. Zbog toga su se vremenom razvile različite metode mjerenja tvrdoće.

### 3.3.1. Povijesni razvoj mjerenja tvrdoće

U ranim počecima su interes za tvrdoću pokazivali jedino metalurzi i mineralozi. Međutim, u posljednjih nekoliko desetljeća, fizičari, kemičari, biolozi, farmaceuti i mnogi drugi su se uključili u ispitivanja tvrdoće. Objavljeno je, do danas mnoštvo knjiga i članaka u znanstvenim časopisima o pogledima i definicijama tvrdoće. Ispitivanje tvrdoće nije više ograničeno samo na metale, nego su trenutno dostupni alati i oprema za ispitivanje širokog spektra materijala, uključujući polimere, elastomere, tanke filmove materijala, keramiku i biomaterijale. Ispitivanje tvrdoće je možda najjednostavnija i najjeftinija metoda za karakterizaciju materijala jer ne zahtijeva posebnu pripremu uzorka, sadrži dosta jeftinu opremu za testiranje i relativno je brza. Teoretska i empirijska istraživanja su pokazala prilično točne kvantitativne odnose između tvrdoće i drugih mehaničkih svojstava poput vlačne čvrstoće, čvrstoće popuštanja i sl. [10]

1977. je Međunarodno društvo za mehaniku stijena, ISRM (*International Society for Rock Mechanics*) predložilo metode za određivanje tvrdoće stijena. Prvenstveno su odabrali ispitivanja utiskivanjem prema Knoop-u i Vickers-u s niskim opterećenjima, dok su Brinell-ovu i Rockwell-ovu metodu izdvojili pogodnom za utvrđivanje tvrdoće pri najvećim vrijednostima opterećenja kod krutih, odnosno lomljivih stijena. U metode su također naveli i dinamačka i odskočna ispitivanja, poput tvrdoće po Shore-u (*Shore scleroscope*) i Schmidt-u (*Schmidt impact hammer*). [12]

Mjerenje tvrdoće je relativno stari postupak i prva mjerenja tvrdoće datiraju još iz 17. stoljeća. Tijekom vremena stalno su se razvijale nove metode ili poboljšavale (modificirale) stare metode. U tablici 3.1 je prikazan kronološki nastanak prvih publikacija o normama za pojedinu metodu u različitim zemljama svijeta, a u tablici 3.2 dan je pregled povijesnog razvoja mjerenja tvrdoće. Iz navedenih činjenica povijesnog razvoja pojedinih mjernih veličina može se zaključiti da se veličina tvrdoća, iako ovisna o mjerenju veličina sile i duljine, samostalno razvijala. [13]

Tablica 3.1. Prve publikacije o normama za pojedinu metodu u različitim zemljama [13]

| metoda   | Njemačka | Velika<br>Britanija | SAD   | Francuska | ISO   |
|----------|----------|---------------------|-------|-----------|-------|
| Brinell  | 1942.    | 1937.               | 1924. | 1946.     | 1981. |
| Rockwell | 1942.    | 1940.               | 1932. | 1946.     | 1986. |
| Vickers  | 1940.    | 1931.               | 1952. | 1946.     | 1982. |
| Knoop    | -        | -                   | 1996. | -         | 1993. |





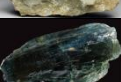
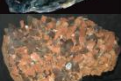
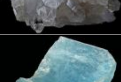
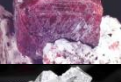
Tablica 3.2. Povijesni razvoj metoda mjerenja tvrdoće [13,14]

| godina | opis  |
|--------|---|
| 1640.  | Barba: ocjenjivanje tvrdoće čelika pomoću turpije   |
| 1722.  | Reaumur: određivanje tvrdoće čelika kroz pravljenje ureza pomoću različitih minerala  |
| 1801.  | Hauy: sistem tvrdoće pomoću riseva sa skalom od četiri stupnja  |
| 1820.  | Mohs postavlja risnu skalu tvrdoće s 10 stupnjeva   |
| 1874.  | Unchatisu: ocjenjuje tvrdoću bronce s 25 cm visokim padajućim dlijetom (dinamička metoda mjerenja tvrdoće)                  |
| 1900.  | Brinell: otkriva metodu gdje je indentor kuglica, po njemu metoda dobila ime  |
| ~1905. | Martens: otkriva princip penetracije indentora u ispitni uzorak s istovremenim mjerenjem sile i dubine prodiranja indentora |
| 1907.  | Shore: odskočni postupak za čelike  |
| 1920.  | Rockwell: postupak mjerenja tvrdoće s uporabom predopterećenja i mjerenja dubine prodiranja indentora                       |
| 1925.  | Smith i Sandland otkrivaju Vickers metodu mjerenja tvrdoće  |
| 1939.  | Knoop   |
| 1950.  | Berkovich: trokutna piramida  |

Prvu metodu za mjerenje tvrdoće, koja je klasificirala različite materijale u određene razrede tvrdoće, razvio je još početkom devetnaestog stoljeća Friedrich Mohs (1773. – 1839.), njemački geolog/mineralog. Prema Mohsovoj skali materijali su svrstani u 10 razreda tvrdoće, ali ona vrijedi samo za minerale. Vrijednost tvrdoće 1 ima najmekši, a vrijednost 10 najtvrđi mineral. Podjela je načinjena na takav način da se materijal (mineral) u nekom razredu daje zastrugati s materijalom iz višeg razreda tvrdoće koji slijedi. Mohsova metoda odnosno skala se ne primjenjuje za mjerenje tvrdoće tehničkih materijala. Na tom području razvijen je čitav niz metoda ispitivanja tvrdoće. Što se tiče samih minerala, još je uvijek široko primjenjiva. U namjeri poboljšanja metode, razvijeni su skleroskopiji za grebanje s oštrim dijamantnim vrhom. Talmage i Bierbaum uređaji su među bolje poznatima skleroskopijama za grebanje. [1,13,15]

U tablici 3.3 su prikazani minerali razvrstani u razrede tvrdoće prema Mohs-u.

Tablica 3.3. Mohs-ova skala tvrdoće [7]

|    | Mineral  |   | Apsolutna tvrdoća | Test grebanjem                             |
|----|----------|---|-------------------|--|
| 1  | Talk     |    | 1                 | lagano noktom                              |
| 2  | Gips     |    | 2                 | noktom                                     |
| 3  | Kalcit   |    | 9                 | lagano bakrenom žicom                      |
| 4  | Fluorit  |    | 21                | lagano nožem                               |
| 5  | Apatit   |    | 48                | teško nožem                                |
| 6  | Ortoklaz |    | 72                | alatnim čelikom                            |
| 7  | Kremen   |    | 100               | grebe staklo                               |
| 8  | Topaz    |   | 200               | lagano grebe staklo                        |
| 9  | Korund   |  | 400               | reže staklo, grebe ga dijamant             |
| 10 | dijamant |  | 1500              | grebe korund, grebe ga samo drugi dijamant |

Prema ISRM-u su za ispitivanje tvrdoće stijena 70-ih godina, najpogodnije metode bile: dinamičko ispitivanje tvrdoće Shore-ovim skleroskopom i odskočna metoda Schmidt-ovim čekićem. Navedene dvije metode su opisane u sljedećim poglavljima.

### 3.3.2. Metoda mjerenja tvrdoće prema Shore-u

Ova laboratorijska metoda se koristi za određivanje tvrdoće minerala kamena koristeći Shore-ov skleroskop i za provjeru točnosti ostalih mjernih uređaja tj. skleroskopa. Tvrdoću predstavlja prosjek vrijednosti izmjerenih nasumce na pojedinim zrnima minerala.

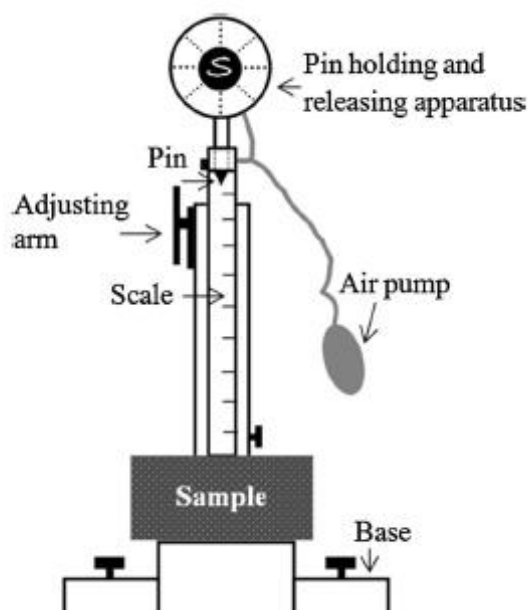
Skleroskop je instrument kojeg je izumio Albert Shore 1907. godine. Bio je to prvi komercijalni metalurški uređaj za ispitivanje tvrdoće stijena prihvaćen od strane mnogih geotehničkih inženjera. [16]

Skleroskop (slika 3.2) se sastoji od čeličnog čekića koji pokreće opruga, i koji kad se otpusti, udari u ticalo koje je u dodiru s ispitivanom površinom. Duljina odskoka čeličnog čekića od čeličnog ticala mjeri se pomoću linearne podjele koja je sastavni dio uređaja. Skleroskop za mjerenje tvrdoće dolazi u dva modela, model C i model D, od kojih je C-2 preporučeno koristiti za mjerenje tvrdoće kamena. Model C-2 se sastoji od precizne vertikalno postavljene staklene cijevi s provrtom kroz koju je vidljiva ljestvica s vrijednostima od 0 do 140. Pneumatski pokretana glava je zalijepljena na vrh cijevi i pokreće gumenu kuglicu. Čekić pada s određene visine i odskače unutar staklene cijevi. Nakon njegovog udara na površinu, mjeri se njegova visina odskoka koja pokazuje kolika je tvrdoća tog materijala. [15]

Čekić modela C-2 ima sljedeće dimenzije: [15]

|                        |                          |
|------------------------|--------------------------|
| promjer                | 5,94 mm                  |
| masa                   | $2,300 \pm 0,500$ g      |
| ukupna duljina         | 20,7 do 21,3 mm          |
| udaljenost pada čekića | $251,2 + 0,13 - 0,38$ mm |

Prije svakog korištenja je potrebno napraviti barem pet mjerenja na standardnom ispitnom bloku danom od strane proizvođača. Ako izmjerene vrijednosti ulaze u zadani raspon, točnost uređaja se smatra zadovoljavajućom. Ispitivanja je potrebno provoditi na ravnim površinama na kojim se primjenjuje abrazivni aluminijev oksid, prašak koji zaglađuje površinu. Rezultati dobiveni mjerenjem pretjerano grube površine su uglavnom netočni i niskih vrijednosti.



Slika 3.2. Shore-ov skleroskop [17]



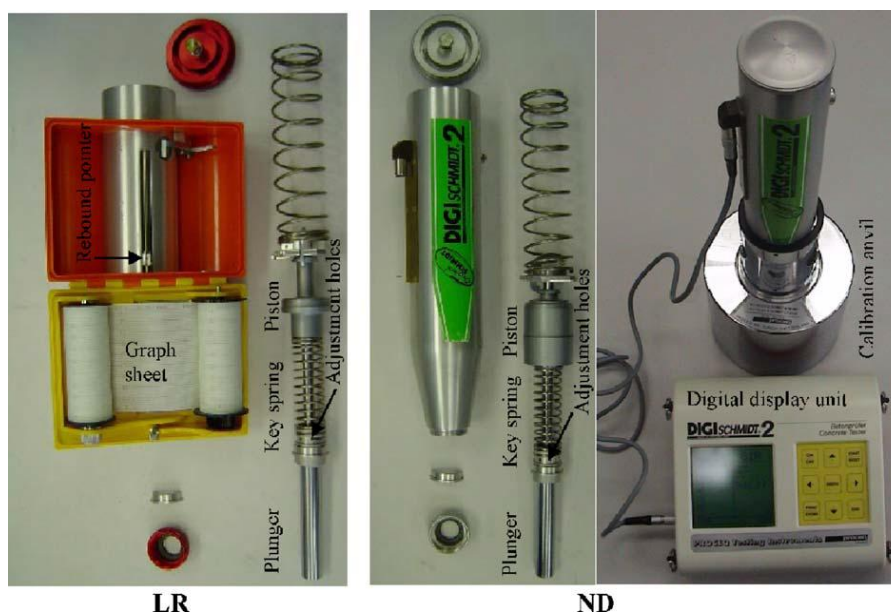
Pri mjerenju tvrdoće skleroskopom potrebno je ispuniti i sljedeće zahtjeve: [15]

- uzorci trebaju imati dostupnu mjernu površinu od najmanje 10 cm<sup>2</sup> debljine 1 cm (sitne uzorke je potrebno dobro stegnuti u smjeru okomitom na os skleroskopa)
- ukoliko je površina kamena hrapava, mekana, vlažna ili sa slobodnim česticama morta potrebno ju je izbrusiti brusnim kamenom ili brusilicom, očistiti i osušiti
- ispitivanje se vrši pri temperaturi od 10°C do 35°C
- mjerni uređaj je potrebno čvrsto držati, okomito na površinu uzorka kako bi se spriječio nastanak pogreške
- greška nastaje ako se mjerenja izvode preblizu jedno drugom tako da je propisan najmanje potreban razmak na površini između mjernih mjesta od 5 mm
- potrebno je najmanje 20 ponavljanja kako bi se dobili mjerodavni rezultati

### 3.3.3. Određivanje tvrdoće prema Schmidt-u

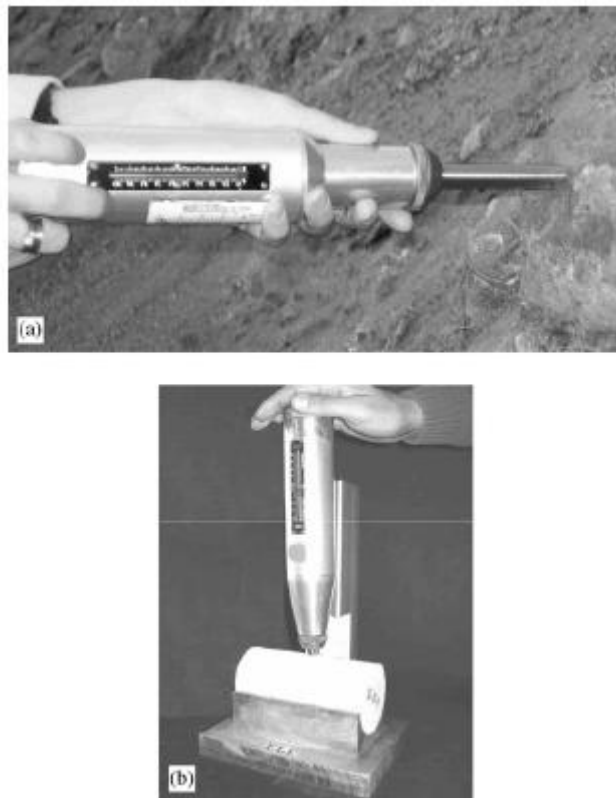
Schmidt-ov čekić (metoda odskoka) je instrument za ispitivanje tvrdoće, izvorno dizajniran za nedestruktivna ispitivanja kvalitete betona na licu mjesta. Taj lagani ručni alat ima široku primjenu u procjeni jednoosne tlačne čvrstoće prirodnog kamena. Prikazan je na slici 3.3. [16]

Što se tiče područja primjene, metodu se predlaže koristiti za određivanje tvrdoće kamena, ali je istovremeno ograničena primjenom na vrlo tvrdom ili vrlo mekom kamenju.



Slika 3.3. Schmidt-ov čekić [18]

Mjerni uređaj se sastoji od Schmidt-ovog čekića čijim se odskokom mjeri tvrdoća ispitivanog materijala, dok je uzorak pričvršćen za čeličnu bazu minimalne težine 20 kg. Klip čekića je smješten nasuprot ispitivanog uzorka i utiskuje se u čekić pritiskanjem uzorka. Upotrijebljena sila djeluje na oprugu koja se automatski otpušta pri propisanoj razini energije (sile) i suprostavlja se klipu. Visina odskoka mase između klipa i opruge se mjeri na označenoj skali i uzima kao mjera tvrdoće. Uređaj je prenosiv i može se koristiti i van laboratorija (slika 3.4). Postoje različiti modeli Schmidt-ovih čekića s različitim vrijednostima primijenjenih sila. [15]



Slika 3.4. Upotreba Schmidt-ovog čekića: a) na terenu, b) u laboratoriju [19]

Uvjeti koje treba ispuniti prije provođenja mjerenja: [15]

- kalibriranje čekića po uputama proizvođača (10 ponavljanja)
- uzorci u laboratoriju trebaju biti reprezentativni dijelovi kamena čija se svojstva ispituju (kad je moguće, preporučljivo je koristiti što veće uzorke)
- površina uzorka na koju se postavlja mjerni uređaj mora biti glatka i ravna, a na dubini od 6 cm ne smije biti pukotina niti lokalnih diskontinuiteta u materijalu
- uzorke manjih dimenzija je potrebno dobro fiksirati za podlogu kako bi se spriječio nastanak vibracija tijekom mjerenja

- na dobivenu vrijednost tvrdoće utječe i orijentacija čekića - preporučljive su tri orijentacije: vertikalno gore, horizontalno i vertikalno dolje s dozvoljenim odstupanjem od  $\pm 5^\circ$
- potrebno je provesti najmanje 20 mjerenja za pojedinu vrstu kamena, a svaki sljedeći položaj mjerenja treba biti udaljen od prethodnog barem za promjer klipa (loša priprema uzoraka i izvođenje mjerenja uzrokuje očitavanje niskih vrijednosti tvrdoće)

Metode po Shore-u i Schmidt-u su jednostavne za provedbu jer ne zahtijevaju posebnu pripremu uzorka i oprema za ispitivanje je manje sofisticirana i prenosiva. Metode su praktične i ekonomične, a ograničenja su uglavnom povezana s veličinom zrna, poroznošću i homogenošću ispitivanog materijala. [20]

### 3.3.4. Metode mjerenja tvrdoće

Koncept tvrdoće odnosi se na bilo koji indikator otpornosti materijala na sile koje djeluju na jako malu površinu materijala i usko je povezan sa svojstvima abrazivnosti i otpornosti na trošenje. Poznata su dva kriterija procjene tvrdoće, jedan baziran na Moshovoj skali tvrdoće i drugi baziran na otpornosti na utisak prema Prandtl-u. Moshov sistem izravno povezuje tvrdoću, abrazivnost i otpornost na trošenje pod pretpostavkom da svi materijali mogu biti razvrstani prema skali u kojoj svaki materijal može ogrebat i onoga ispod sebe. Prandtlova tvrdoća penetracijom (prodiranjem) može se izraziti, ili kao sila potrebna da se idealno kruto tijelo malih dimenzija utisne u ispitivani materijal, ili kao dubina otiska dobivena utiskivanjem idealnog krutog tijela pod standardiziranom silom. Problem ovdje leži u činjenici da je ispitna oprema često specijalizirana što znači da je razvijena za posebnu skupinu materijala. Ograničenja metode su to, što ispitni uzorci moraju biti ispolirani i udubljenja uzrokovana dijamantnim penetratorom su vidljiva samo pod mikroskopom. [21]

Postoji jako puno metoda ispitivanja tvrdoće materijala (tablica 3.4). Mogu biti klasificirane prema različitim kriterijima, uključujući vrstu mjerenja, vrijednost indentacijske sile i samu prirodu ispitivanja (statičko, dinamičko, ispitivanje grebanjem). Mnoga navedena ispitivanja mjere tvrdoću u različitim eksperimentalnim uvjetima, na primjer, indentori različitih veličina, oblika i materijala s odgovarajuće primjenjenim opterećenjem. Ispitivanje tvrdoće može biti dinamičko ili statičko. Dinamička metoda mjeri tvrdoću s obzirom na elastično ponašanje materijala, dok statička metoda mjeri tvrdoću s obzirom na njegovo plastično ponašanje. Prema primjenjenim silama se ispitivanjima mjere makro-, mikro- i nanotvrdoća. Uobičajeno

korišteni nazivi mikro- i nanotvrdoće se ne odnose na različite tvrdoće, nego su ovisne o tome da li se otisak indentera mjeri prema mikro- ili nano-skali. [10]

Tablica 3.4. Klasifikacija metoda za mjerenje tvrdoće [10]

| Klasifikacija po                            |                               | Metode ispitivanja tvrdoće                           |   |
|---|-------------------------------|--|---|
| razred                                      | podrazred                     |  |   |
| Trenje ili metoda utiskivanja               | dinamičko ispitivanje tvrdoće | Ispitivanje tvrdoće grebanjem                        | Reaumur test grebanja (1722.)<br>Mohsov test tvrdoće (1822.)<br>Turner-sklerometar test (1895.)                                       |
|   |                               | Ispitivanje tvrdoće odskokom                         | Test skleroskopom<br>Shore-ov test sklerometrom (1907.)<br>Leeb test tvrdoće (1975.)  |
|   |                               | Ispitivanje tvrdoće oranjem ( <i>plowing</i> )       | Bleraum sklerometar test  |
|   |                               | Ispitivanje tvrdoće rezanjem                         |   |
|   |                               | Ispitivanje tvrdoće prigušivanjem ( <i>damping</i> ) | Herbert Pendulum test (1923.)<br>Kusnezor Pendulum test   |
|   |                               | Ispitivanje tvrdoće abrazijom                        | Test pkeščanim mlazom   |
|   |                               | Ispitivanje tvrdoće erozijom                         |   |
|   | Cloudburst test               |  |   |
|   | statičko ispitivanje tvrdoće  | Ispitivanje tvrdoće statičkim utiskivanjem           | Brinell-ov test (1900.)<br>Rockwell-ov test (1920.)<br>Vickers-ov test (1925.)<br>Knoop-ov test (1930.)                               |
| Veličina utiskivanja (magnituda utiskivača) | makro                         | Ispitivanje - Makro utiskivanje (Viša opterećenja)   | Brinell-ov test (500-3000 kg)<br>Rockwell-ov test (15-150 kg)<br>Vickers – ov test (1-120 kg)   |
|   | mikro                         | Mikro utiskivanje                                    | Vickers-ov test (1-200 kg)<br>Knoop-ov test (1-200 kg)  |
|   | nano                          | Nano utiskivanje                                     | Nano test utiskivanja (0,1 mN , dubina <200nm)  |
| Vrsta mjerenja                              | dimenzije                     | Mjerenje dimenzija utiska                            | Brinell-ov test (zakrivljena površina)<br>Vickers-ov test ( površina kontakta piramida)<br>Knoop-ov test (površina kontakta piramida) |
|   | dubina                        | Mjerenje dubine utiska                               | Rockwell-ov test (1920.)<br>Martensov test<br>Nano utiskivanje metoda   |
| Vrsta utiskivača                            | kuglica                       | Utiskivač kuglica                                    | Brinell-ov test<br>Rockwell (za sve druge razrede osim A, C, D, N)  |
|   | piramida                      | Dijamantni piramidalni utiskivač                     | Vickers-ov test (kut 136°)<br>Knoop- ov test (romboidni s kutovima 172°30' i 130')  |
|   | stožasti dijamant             | Stožasti dijamant                                    | Roskwell-ov test (za razrede A, C, D , N)   |
|   | Berkovich tip                 | Berkovich nano utiskivač                             | Nano utiskivač  |

Tvrdoća i abrazivnost kamena ovise o vrsti i udjelu različitih minerala od koji se pojedini kamen sastoji te čvrstoći veziva između zrna minerala. Tvrdoća se može definirati kao bitno svojstvo materijala, ali i kao koncept ponašanja materijala prema kojemu kvantitativne izmjerene vrijednosti tvrdoće ovise o primijenjenoj metodi mjerenja. Kroz povijest su se koristile tri metode za mjerenje tvrdoće kamena i minerala, a to su: metoda utiskivanja, dinamička ili metoda odskoka i metoda grebanja. [15]

Po načinu djelovanja sile postupci se mogu podijeliti na statičke, s malom brzinom prirasta opterećenja i dinamičke, karakterizirane naglim udarnim djelovanjem. Kod statičkih metoda ispitna sila koja djeluje na utiskivač postepeno raste do maksimalne vrijednosti, dok se kod dinamičkih ispitivanja, sila ostvaruje udarom, odnosno tvrdoća se određuje na osnovu elastičnog odskoka. U dinamičkim metodama indenter pada s određene visine na površinu uzorka i mjeri se dubina dobivenog utiska. Tvrdoća se izražava pomoću energije udara, dubine i veličine utiskivanja. Najčešće korištene metode mjerenja tvrdoće, statičke i dinamičke navedene su u tablici 3.5. [10]

Tablica 3.5. Metode određivanja tvrdoće [10]

| STATIČKE METODE          | DINAMIČKE METODE      |
|--------------------------|-----------------------|
| Brinell-ova metoda, HBW  | Poldy-eva metoda, HP  |
| Vickers-ova metoda, HV   | Shore-ova metoda, HS  |
| Rockwell-ova metoda, HRC | Durokopska metoda, HD |
| Knoop-ova metoda, HK     |                       |

Brinell-ova i Rockwell-ova metoda su vrlo poznate metode utiskivanja pogotovo kod mjerenja tvrdoće metala, ali nisu uobičajene za mjerenje tvrdoće kamena zbog njegove krte i lomljive prirode. Pomoću Knoop-ove i Vickers-ove metode je moguće odrediti mikrotvrdoću minerala od kojih je građen kamen. Dijamant u obliku piramide se utiskuje u površinu ispitivanog materijala određenom silom. Kvocijent površine otiska trajno deformiranog materijala i primijenjene sile je mjera tvrdoće. [15]

Kod dinamičkih se metoda koristi pokretan indenter koji udara u površinu ispitivanog materijala tj. uzorka. Udarom u materijal dolazi do pojave plastične deformacije materijala i smanjenja elastičnog povrata. Visina odskoka indentora se smatra mjerom tvrdoće materijala. Kao što je već navedeno, najpoznatije dinamičke metode su mjerenje tvrdoće prema Shore-u i Schmidt-u. [15]

Zajedničko svim metodama mjerenja jest da su oštećenja na ispitivanom materijalu neznatna, a često se ne mogu niti vidjeti prostim okom. Mehaničke karakteristike materijala se uopće ne mijenjaju ili se vrlo malo mijenjaju nakon takvih ispitivanja, dok egzaktna definicija tvrdoće ovisi o geometriji utiskivača. Rasprostranjena geometrija utiskivača koja se koristi je četverostrana piramida kod Vickers-a, kuglica kod Brinell-a, stožac kod Rockwell-a i romboidna piramida kod Knoop-a.

Općenito, ispitivanje tvrdoće utiskivanjem sadrži sljedeće korake:

- 1) pritiskanje indentora dok se ne postigne specifična maksimalna sila
- 2) zadržavanje maksimalne sile određeno vrijeme, 10 s
- 3) oslobađanje od pritiska (popuštanje)

S obzirom na iznos primijenjene sile utiskivanja, tvrdoća se može sistematizirati na makro-, mikro- i nanotvrdoću. [10]

- makrotvrdoća se ispituje statičkim i dinamičkim metodama. Statičke metode imaju prednost jer se lakše ponavljaju, dok se dinamičke metode provode ručno uz pomoć jednostavnijih uređaja. Mjerenje makrotvrdoće se primjenjuje za kontrolu kakvoće materijala. Makrotvrdoća predstavlja ispitivanje gdje je sila opterećivanja jednaka ili veća od 49,03 N.
- mikrotvrdoća je tvrdoća određena pod djelovanjem manjih sila utiskivanja. Sile utiskivanja su manje od 1,96 N. Otisci su najčešće vrlo mali tako da se moraju mjeriti mikroskopom. Mjerenjem mikrotvrdoće moguće je odrediti tvrdoću pojedinih kristalnih zrna u mikrostrukturi materijala, odnosno tvrdoću različitih mikrostrukturnih konstituenata.
- nanotvrdoća se koristi kod ispitivanja tvrdoće različitih faza, uključaka u mikrostrukturi te vrlo tankih prevlaka, uz pomoć mikroskopa. Nanoindentori utiskuju svoj vrh u uzorak neprekidno mjereći primijenjeno opterećenje, dubinu i vrijeme prodiranja. Nanotvrdoća se mjeri primjenom jako malih sila, iznosa 1nN pomoću specijalnih uređaja.

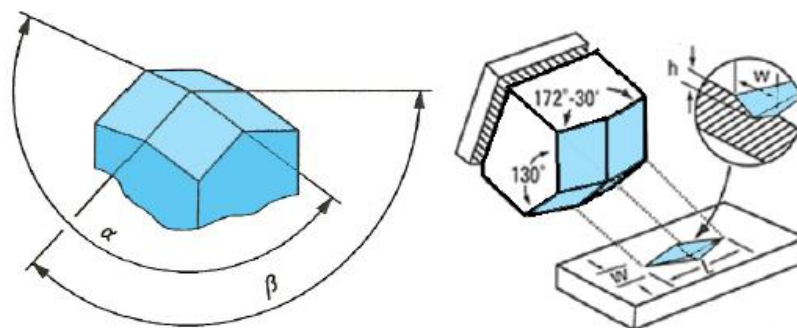
Ispitivanje tvrdoće utiskivanjem je vrlo često korišteno u znanosti, inženjerstvu materijala za karakterizaciju čvrstoće krutina budući da jednostavno i potreban je mali napor za pripremu uzoraka (Tabor 1951.; Blumenauer, 1994.). Metoda ispitivanja mikrotvrdoće prikladna je za istraživanje lokalnog deformacijskog ponašanja minerala, tankih filmova ili čestica u kompozitima. S reološkog stajališta ponašanja materijala to znači da se ispitivanje tvrdoće

mikroutiskivanjem može izvesti na odabranim milimetarskim zrnima unutar prirodnih višefaznih stijena. [22]

Danas, ISRM međunarodno društvo predlaže postupak mjerenja tvrdoće utiskivanjem temeljen na upotrebi stožastog indentora sa kutem od  $60^\circ$  sa zaobljenim vrhom radijusa 5 mm. Navedenim postupkom se mjeri indeks tvrdoće utiskivanjem, tzv. IHI –vrijednost koja je definirana kao kvocijent najvećeg primijenjenog opterećenja i najveće dubine utiskivanja. IHI indeks za kamen vrlo visoke tvrdoće iznosi  $IHI > 50$ , dok je za vrlo meki kamen  $IHI < 8$ . [12]

### 3.3.5. Knoop-ova metoda mjerenja tvrdoće [23]

Knoopova metoda nastala je 1969. godine kao inačica Vickersove metode. Kod ove metode indentor je dijamantna piramida romboidne baze, omjera dijagonala 7:1 (slika 3.5). Vršni kutevi piramide iznose  $136^\circ$  i  $172^\circ 30'$ , dok se tvrdoća izražava kao odnos sile utiskivanja i površine otiska.



Slika 3.5. Geometrija indentora i otiska kod Knoop-ove metode [20]

Geometrija dijamantnog indentora definirana je kutevima  $\alpha$  i  $\beta$  između nasuprotnih ploha koji iznose  $172^\circ 30'$ , odnosno  $130^\circ$  u odnosu na uzdužnu os indentora. Utiskivanje se vrši silom  $F$  u rasponu od 0,09807 N do 19,613 N. Nakon prestanka djelovanja sile potrebno je izmjeriti samo jednu dijagonalu otiska, i to onu dulju. Ova metoda se preporučuje samo ako je duljina veće dijagonale otiska veća od 0,020 mm. Pošto se primjenjuju relativno male sile utiskivanja otisak je vrlo malen te je potreban mjerni mikroskop. Mjerni sustav za očitavanje treba imati podjelu od  $0,1 \mu\text{m}$ , a povećanje treba biti takvo da veća dijagonala zauzima barem 25% vidnog polja, ali ne prelazi 75%.

Što se tiče provedbe mjerenja, uzorak je potrebno fino pripremiti što uključuje grubo i fino brušenje te naknadno poliranje. Ispitna površina ne smije sadržavati nikakve okside niti

masnoće. Na tako pripremljenom uzorku utiskuje se penetrator pod djelovanjem točno određene sile (tablica 3.6).

Tablica 3.6. Ispitne sile kod Knoop-ove metode [23]

| Oznaka   | Primjenjena sila utiskivanja, [N] |
|----------|-----------------------------------|
| HK 0,01  | 0,09807                           |
| HK 0,02  | 0,1961                            |
| HK 0,025 | 0,2452                            |
| HK 0,05  | 0,4903                            |
| HK 0,1   | 0,9807                            |
| HK 0,2   | 1,961                             |
| HK 0,3   | 2,942                             |
| HK 0,5   | 4,903                             |
| HK 1     | 9,907                             |
| HK 2     | 19,614                            |
| HK 3     | 29,42                             |
| HK 5     | 49,03                             |
| HK 10    | 98,07                             |

Vrijeme trajanja opterećenja iznosi od 10 do 15 sekundi. Istekom tog vremena indentor se podiže i u materijalu ostavlja otisak oblika izduženog romba. Veličina otiska određuje se optičkim mjernim mikroskopom, temeljem mjerenja dulje dijagonale. Mjerenja je potrebno provesti uz što manje vibracija.

Knoopova tvrdoća određuje se računski kao omjer ispitne sile i projicirane površine otiska. Stoga je izraz za Knoop-ovu tvrdoću:

$$HK = 0,102 \cdot \frac{F}{c_k \cdot d_k^2} = 1,451 \cdot \frac{F}{d_k^2}, \quad \text{gdje je:}$$

$F$  – primijenjena sila utiskivanja, [N]  
 $c_k$  – konstanta indentora  
 $d_k$  – duljina duže dijagonale otiska, [mm]

Konstanta  $c_k$  povezuje projiciranu površinu otiska sa kvadratom duljine duže dijagonale, a kao funkcija geometrije indentora slijedi iz izraza:

$$c_k = \frac{tg \frac{\beta}{2}}{2tg \frac{\alpha}{2}}, \quad \text{pri čemu su } \alpha \text{ i } \beta \text{ kutevi između nasuprotnih ploha indentora.}$$

Ispitivanje se provodi pri okolišnoj temperaturi  $23 \pm 5$  °C i potrebno ispuniti sljedeće zahtjeve:



- udaljenost između rubova dva susjedna otiska postrance smještena mora biti najmanje 2,5 puta duljine kraće dijagonale
- za otiske koji su orijentirani tako da leže vrh do vrha, minimalna udaljenost treba odgovarati barem jednoj duljini dulje dijagonale
- ako su dva otiska različite veličine, minimalan razmak između njih određuje se na temelju kraće dijagonale većeg otiska
- udaljenost između ruba otiska i kraja ispitnog uzorka treba biti barem 3 puta veća od kraće dijagonale otiska
- za vrijeme mjerenja ne smije biti vibracija ni udara. Brzina prilaženja indentora mora se kretati u rasponu od 15  $\mu\text{m/s}$  do 70  $\mu\text{m/s}$ .

Knoop-ova tvrdoća se navodi na sljedeći način:

|   |                   |                     |                        |
|---|-------------------|---------------------|------------------------|
| <u>640</u> <u>HK</u> <u>0,1</u> / <u>20</u> |                   |                     |                        |
| vrijednost<br>tvrdoće                       | oznaka<br>tvrdoće | sila<br>utiskivanja | vrijeme<br>utiskivanja |

Knoop-ova metoda je za razliku od Vickers-ove osjetljivija na pripremu površine, ali je manje podložna mjernim pogreškama. Dok se metoda po Vickers-u općenito rabi za ispitivanje manjih područja simetričnog oblika, Knoop-ova metoda je bolja za mjerenje izduljenih područja, vrlo tvrdih i krhkih materijala te vrlo tankih presjeka odnosno tankih površinskih slojeva. Knoop-ovom metodom se uglavnom određuje tvrdoća relativno krhkih materijala poput keramike i stakla, odnosno tvrdoća tankih prevlaka.

### 3.3.6. Norma – određivanje tvrdoće prema Knoop-u

U poglavlju 3.3.6 dan je kratak pregled norme ISPITNE METODE PRIRODNOG KAMENA– ODREĐIVANJE TVRDOĆE PREMA KNOOPU. Prema navedenoj normi se postupalo u eksperimentalnom dijelu rada pri mjerenju tvrdoće uzoraka kamena.

#### 1) Djelokrug

Ova europska norma određuje metodu određivanja tvrdoće minerala u prirodnom kamenu koristeći Knoop-ov indentor. Ova metoda je jako korisna za karbonatne stijene.

#### 2) Načelo

Nakon provođenja niza utiskivanja pomoću Knoop-ovog indentora, odgovarajuće vrijednosti Knoop-ove mikrotvrdoće su izračunate i dana je raspodjela mikrotvrdoća.

### 3) **Simboli**

P – opterećenje na indentor, u N

L – duljina najdulje dijagonale utiska, u mm

HK – Knoop-ova mikrotvrdoća, u MPa

HK25 – Knoop-ova mikrotvrdoća koja odgovara kumulativnoj frekvenciji od 25% (donji kvartil), Mpa

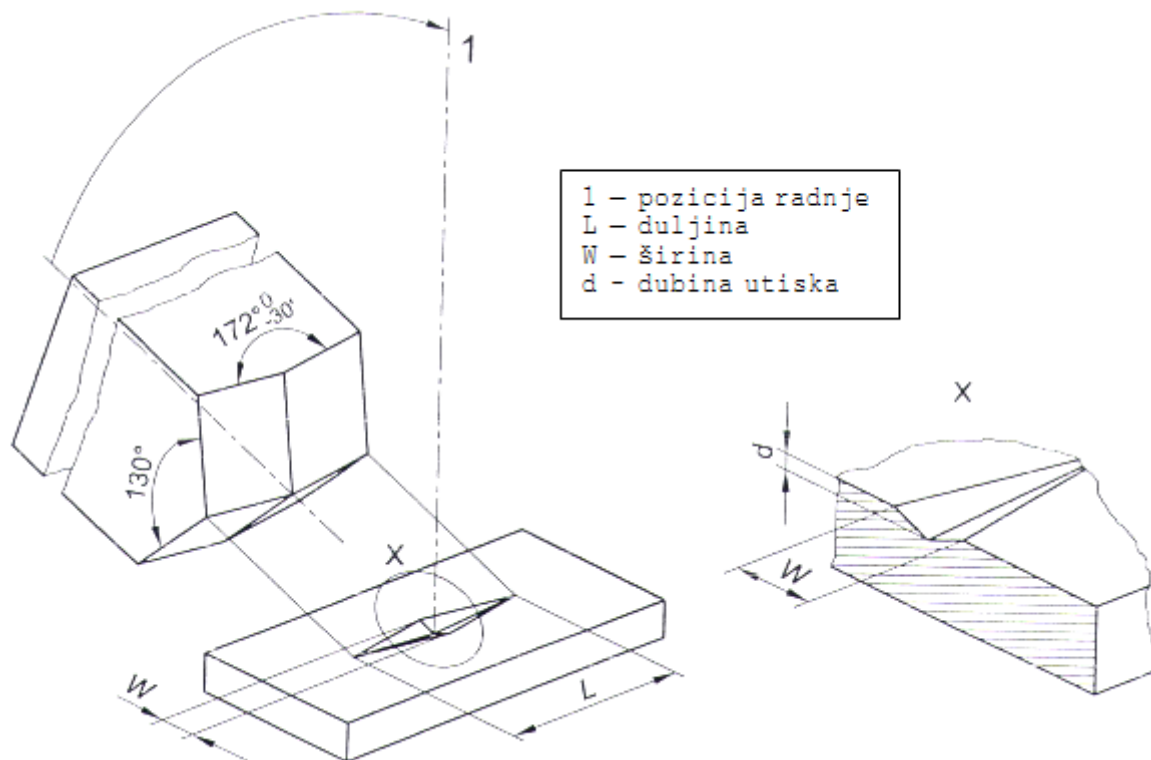
HK50 - Knoop-ova mikrotvrdoća koja odgovara kumulativnoj frekvenciji od 50% (srednji kvartil), Mpa

HK75 - Knoop-ova mikrotvrdoća koja odgovara kumulativnoj frekvenciji od 75% (gornji kvartil), Mpa

### 4) **Uređaj**

Mikrodurimeter se sastoji u suštini od sljedećih dijelova:

- držač uzorka s mehanizmom za horizontalne pomake u dva ortogonalna smjera pomoću vijaka za podešavanje koji također mjere količinu gibanja
- Knoop-ov indentor (slika 6.4)
- postava izmjenjivih utega od 0,1 do 5,0 N
- uređaj za nanošenje opterećenja na indentor različitim brzinama
- mikroskop s mikrometrom za mjerenje širine i dužine utiska s točnošću od 0,5 mikrometara



Slika 3.6. Knoop-ov uređaj i utiskivanje

## 5) Priprema uzoraka

### 5.1. Uzorkovanje

Uzorkovanje nije odgovornost ispitnog laboratorija osim ako to nije zahtijevano.

### 5.2. Broj uzoraka

Barem jedan polirani odjeljak treba biti pripremljen približno 20 mm širine, 30 mm dužine i 10 mm debljine. Ostale veličine se mogu koristiti ako ima dovoljno mjesta na poliranoj površini za potrebna utiskivanja.

Za kamen koji ima ravnine s izraženom anizotropijom (foliacije), trebaju se prirediti barem dva polirana odjeljka: jedan s poliranom površinom koja je paralelna s ravninama anizotropnije, a drugi okomito.

U slučaju vrlo nehomogenih krupnozrnatih kamenja, nužno je da se priredi veća površina nego prethodno opisana ili alternativno, koristiti nekoliko odjeljaka standardne veličine (tako da budu dovoljno reprezentativne za uzorak).

## 6) Postupak ispitivanja

Test se sastoji od:

- 20 utiskivanja, u redu s razmakom od 1 mm, za sitnozrnata, vidno jedinstvene vrste kamena
- tri serije (20+10+10) utiskivanja za heterogene, srednje zrnato ili krupnozrnato kamenje; u svakoj seriji razmak između utiskivanja će biti 1 mm
- 8 serija od 10 utiskivanja svaki za jako heterogeno ili krupnozrnato kamenje; u svakoj seriji razmak između utiskivanja ne bi trebao biti manji od 2 mm

Postupiti kako slijedi:

- 1) namjestiti izabrani uteg (vidi 4) na mjesto za primjenu opterećenja

NOTE 1: Primijenjeno opterećenje jednako je za sve vrste kamena (preporučeno opterećenje je 1,96 N budući da ono uzrokuje utiskivanja koja se mogu mjeriti i u tvrdom i mekom kamenu).

- 2) postaviti uzorak na držač uzorka i fokusirati pomoću mikroskopske leće
- 3) postaviti početnu točku prema kojoj će se linearno orijentirati slijed od 20 utiskivanja prema sredini odjeljka. Kod kamena s izraženom anizotropijom izabire se slijed utiskivanja okomit na ravnine anizotropije
- 4) rotirati leću da se indentor pomakne do prve točke uzorka i aktivirati mehanizam spuštanja indentora

NOTE 2: Brzina nanošenja opterećenja ista je za sve vrste kamena (preporučena brzina nanošenja opterećenja je da se opterećenje od 1,96N nanese u vremenu od 40s)

- 5) kada se opterećenje nanese, podigći indentor, okrenuti leće u položaj za rad i tada izmjeriti dužinu najveće dijagonale utiska pomoću stupnjevane ljestvice na mikroskopu
- 6) pomaknuti uzorak za 1 mm u smjeru odabranom za daljnja mjerenja; indentor je sada u poziciji za mjerenje druge točke. Za homogeno sitnozrnato kamenje ponoviti navedeni postupak za 20 utiskivanja i mjerenja

NOTE 3: kako bi se izbjegla pravilna pozicioniranja, potrebno je pomaknuti uzorak za 1 mm između trenutnog i sljedećeg mjerenja bez gledanja kroz mikroskop

- 7) u slučaju heterogenog, srednjezrnatog i krupnozrnatog kamena, učiniti još 2 serije od po 10 mjerenja, s razmakom 1 mm, u bilo kojem smjeru drugačijem od početnog (za ukupno 40 utiskivanja)
- 8) u slučaju jako heterogenog ili krupnozrnatog kamena, potrebno je učiniti još 40 utiskivanja na bar jednom uzorku ili tom istom uzorku (ako se koristi polirani uzorak velikih dimenzija). U oba slučaja razmak između utiskivanja ne smije biti manji od 2 mm.

### 7) Prikaz rezultata

Za svako utiskivanje, Knoop-ova tvrdoća HK (u MPa) prikazana je pomoću sljedeće formule:

$$HK = 14,23 \cdot \frac{P}{L^2} \quad \text{gdje su:} \quad \begin{array}{l} P - \text{opterećenje na utiskivač, [N]} \\ L - \text{duljina najduže dijagonale utiska, [mm]} \end{array}$$

Dobivene vrijednosti tvrdoće poredane su u rastućem nizu. Os apscise može biti u postocima: to daje dijagram kumulativne frekvencije vrijednosti mikrotvrdoće kamena („dijagram raspodjele tvrdoće“ slika 2.) Dijelovi dijagrama koji su paralelni s apscisom, prikazuju komponente s dobro definiranom vrijednošću tvrdoće, dok kosi dijelovi dijagrama prikazuju komponente s vrijednostima tvrdoće koje variraju postepeno između ekstrema.

Dijagram raspodjele tvrdoće daje detaljne informacije o tvrdoći kamena, kakogod, za usporedbu, potreban je sintetički izraz rezultata koji će povezati karakteristične vrijednosti (slika 2):

- vrijednost mikrotvrdoće odgovara kumulativnoj frekvenciji od 25% (HK25 ili donji kvartil)
- vrijednost mikrotvrdoće odgovara kumulativnoj frekvenciji od 50% (HK50 ili srednji kvartil)
- vrijednost mikrotvrdoće odgovara kumulativnoj frekvenciji od 75% (HK75 ili gornji kvartil)

NOTE: Odnos između HK75 i HK25 daje naznaku ujednačenosti kamena s gledišta tvrdoće: što je omjer bliži 1, to je kamen jednolikiji.

### Izvešće o ispitivanju

Izvešće o ispitivanju treba sadržavati sljedeće:

- a) jedinstveni matični broj izvješća

- b) broj ,naslov i datum izdavanja ove europske norme
- c) ime i adresu ispitnog laboratorija i adresu gdje se provelo ispitivanje ako je različita od ispitnog laboratorija
- d) ime i adresu klijenta
- e) odgovornost je klijenta da dostavi sljedeće informacije:
  - petrografsko ime kamena
  - komercijalno ime kamena
  - državu i regiju izvlačenja
  - ime dobavljača
  - smjer bilo koje postojeće anizotropije (ako utječe na test) treba biti jasno naznačen na uzorku ili na svakom uzorku pomoću paralelnih linija
  - ime osobe ili organizacije koja provodi uzorkovanje
  - završni sloj uzorka (ako je nužno za ispitivanje)
- f) datum dostave uzoraka
- g) datum kada su polirani uzorci pripremljeni i datum ispitivanja
- h) broj i dimenzije poliranih uzoraka
- i) orijentaciju poliranih površina uzoraka s obzirom na ravnine anizotropije
- j) opterećenje na indetoru i stopa rasta opterećenja
- k) pojedinačne vrijednosti mikrotvrdoće HK, izračunate na temelju slijeda od 20 ili 40 ili 80 mjerenja i dijagram kumulativnih frekvencija (dijagram raspodjele tvrdoće)
- l) srednje vrijednosti pojedinične mikrotvrdoće (HK)
- m) karakteristične vrijednosti mikrotvrdoće: HK25 (donji kvartil), HK50 (srednji kvartil), HK 75 (gornji kvartil)
- n) sva odstupanja od standarda i njihova opravdanja
- o) opaske

Izvješće o ispitivanju treba sadržavati potpise i uloge odgovornih za ispitivanja i datum izdavanja izvješća. Također treba navesti da se izvješće neće djelomično reproducirati bez pismene suglasnosti ispitnog laboratorija.

### **3.3.7. Problemi kod mjerenja tvrdoće**

Konstrukcija, sastavljanje i karakteristike uređaja za mjerenje tvrdoće te okolišni uvjeti, vrlo su značajni za pouzdanost dobivenih rezultata. Pravilnim održavanjem i kontroliranjem

mjerne opreme, edukacijom osoblja te uspostavom odgovarajućeg okruženja bitno se smanjuje mogućnost pogrešaka. Ispravno okruženje i smještaj tvrdomjera bitni su faktori koji određuju točnost i valjanost rezultata mjerenja, ali i trajnost samog uređaja. Kod ispitivanja mikrotvrdoće javljaju se problemi koji se mogu svrstati u tri kategorije: točnost, ponovljivost, korelacija. Točnost je sposobnost instrumenta da se na linearan način može očitati tvrdoća etalonske pločice. Ponovljivost je karakteristika uređaja da pri konstantnom opterećenju ponovljivo iskazuje vrijednosti tvrdoće etalonskog bloka, a korelacija je sposobnost instrumenta da prikaže slične rezultate u odnosu na umjereni instrument ili da dva različita mjeritelja mjere ista utisnuća uz pomoć istog ispitnog uređaja i pri tome postižu slične rezultate. [23]

Značaj mjeritelja u postupku mjerenja tvrdoće također je od velike važnosti. Mjeritelj treba obratiti pažnju na mjesto utisnuća uzimajući u obzir razmak između otisaka i udaljenost od ruba ispitnog uzorka. Zadatak je mjeritelja da predvidi eventualne pogreške, otkloni postojeće i time uspješno provede mjerenje. Ukoliko dva mjeritelja mjere isti otisak vrlo je vjerojatno da neće dobiti istovjetne već samo slične rezultate. Stoga, mjeritelji moraju provjeriti sposobnost očitavanja na mjernim pločicama (etalonima) pri optimalnim uvjetima. Pravilno fokusiranje slike bitno je za ostvarenje točnosti i preciznosti. Zamućena slika ne pokazuje stvarnu veličinu otiska i time daje krivi podatak o tvrdoći. Većina automatiziranih tvrdomjera danas koristi mogućnost automatskog fokusiranja slike i promjene kontrasta. Iščitanje rezultata također može predstavljati svojevrsni izvor pogreške. Tako mjera od 32.3  $\mu\text{m}$  lako može postati 33.2  $\mu\text{m}$ . [23]

### 3.3.8. Nanoutiskivanje

Nanoindentacija ili nanoutiskivanje je pouzdana metoda za mjerenje mehaničkih svojstava tankih filmova i malih volumena većine materijala. Berkovich indentor je poželjan instrument za mjerenje tvrdoće i Young-ovog modula pri vrlo niskim opterećenjima u rasponu kojih se može koristiti nanoindentor. Za specijalizirane pokuse, druge geometrije indentora kao npr. Knoop-ov mogu imati prednosti primjene. [24]

Početna motivacija za korištenje Knoop-ovog indentora kao nanoindentor je njegova geometrija; dug i vitak indentor se smatrao pogodnim za proučavanje raslojavanja tankih filmova materijala u presjecima, keramičkih elektrodnih čvorišta u minijturnim elektroničkim uređajima ili ovisnosti svojstava biomaterijala o orijentaciji vlakana. Koristeći Knoop-ov

indentor također bi trebalo biti moguće mjerenje mehaničkih svojstava materijala temeljih na premiještanju opterećenja. Knoop-ov indentor može biti posebno pogodan za mjerenja pojedinačnih tankih slojeva i višeslojnih prevlaka ako se njegova duža strana uskladi sa slojevima u presjeku. [24]



## 4. UTJECAJ TVRDOĆE NA BUŠENJE

Pri svakoj vrsti obrade materijala potrebno je uzeti u obzir svojstva obrađivanog materijala, parametre stroja i procesa te režime obrade. Ovisno o promatranim procesima, važno je uzeti u obzir najznačajnija svojstva i parametre te njihov međusobni odnos i utjecaj. Krajnja učinkovitost procesa ovisi upravo o pravilnom postavu režima i parametara s obzirom na svojstva materijala.

### 4.1. Obrada bušenjem

Bušenje je obrada odvajanjem čestica kod koje alat vrši glavno rotacijsko gibanje i posmično translacijsko gibanje, a služi za izradu provrta. Bušenje se spominje od samih početaka čovječanstva. Već su u kameno doba ljudi bušili sjekire od kamena kako bi u njih umetnuli drške. Suvremeni početak razvoja svrdla počinje u Engleskoj u 18. stoljeću, a razvoj bušenja popraćen je promjenama u industriji i potrebama tržišta do danas. [25]

Zadatak svakog reznog alata za obradu materijala odvajanjem čestica je ispunjavanje dva uvjeta:

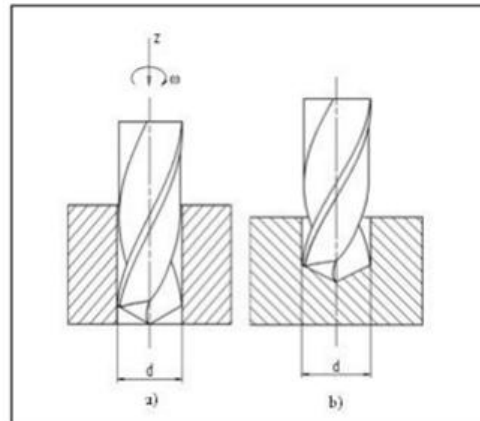
- 1) skinuti određeni sloj materijala s obratka uz nastojanje da se skine što veća količina materijala u jedinici vremena
- 2) oblikovati provrt potrebnih dimenzija uz traženu kvalitetu obrade

Pouzdanost i trajnost alata te kvaliteta obrađene površine ovisi o toplini koja je unesena u postupku obrade. Zbog toga materijali alata moraju također ispunjavati određene uvjete: [25]

- dovoljnu temperaturnu izdržljivosti (da se zadrži tvrdoća na oštrici alata pri temperaturi koju određuje režim obrade)
- dovoljnu čvrstoću i žilavost koja se suprotstavlja mehaničkim naprezanjima statičke i dinamičke naravi
- dovoljnu čvrstoću i tvrdoću koja se suprotstavlja mehaničkom trošenju oštrice i površina na alatu koje su u dodiru s odvojenom česticom i obratkom

Svrdla su alati koji se upotrebljavaju za bušenje i proširivanje provrta različitih dubina u raznim materijalima. Korištenjem odgovarajućeg svrdla se izrađuju prolazni i neprolazni provrti ili se proširuju provrti manjeg promjera. Prolazni provrt nastaje kada svrdlo u procesu

bušenja prolazi kroz cijelu dubinu materijala (slika 4.1a), dok neprolazni provrt nastaje kada se bušenje prekine na raznim dubinama bušućeg materijala i ne postoji izlazna rupa (slika 4.1b). [25]

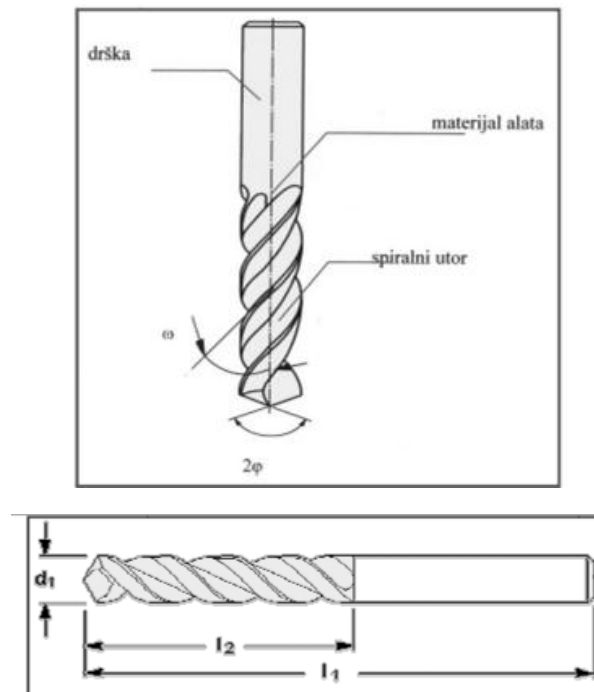


Slika 4.1. Bušenje provrta spiralnim svrdlom: a) prolazni, b) neprolazni provrt [25]

Postoji više podjela svrdla, a najpraktičnija je podjela prema načinu korištenja i izgledu radnog, aktivnog dijela svrdla. Dijelimo ih na: spiralna, svrdla s pločicama od tvrdog metala, ravna, zabušivala, specijalne izvedbe spiralnih svrdla, noževi i motke za bušenje. Postupak bušenja spiralnim svrdlom naziva se obično ili klasično bušenje. Spiralna svrdla su cilindrično-rotacijski alati, koji imaju dvije rezne oštrice simetrične u odnosu na os svrdla. Karakteristika bušenja je da se tijekom obrade ne mijenja poprečni presjek odvojene čestice. Samo promjenom posmaka prije početka obrade moguće je mijenjati presjek odvojene čestice. Klasičnim bušenjem naziva se bušenje pri kojem dužina provrta ne prelazi 5-8 promjera svrdla, iz razloga što kod prekoračenja ovog odnosa dolazi do otežanog odvođenja odvojene čestice uzdužnim žljebovima na svrdlu (koji inače služe za odvođenje odvojene čestice iz zone rezanja). U slučaju veće dubine provrta materijala koji se buši, vrši se postupak dubinskog bušenja kod kojeg je osobito važan element odvođenja odvojenih čestica i samog hlađenja mjesta dubinskog bušenja. [25]

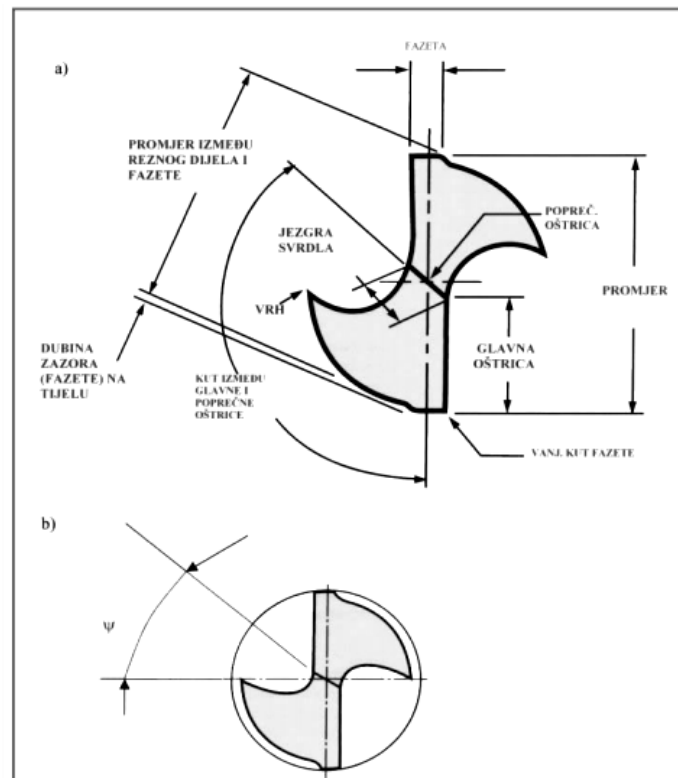
Spiralno svrdlo (slika 4.2) se sastoji od: [25, 26]

- radne dužine svrdla  $l_2$  (slika 4.3) koja sadrži utore, a uključuje u sebi rezni i kalibrirajući dio
- reznog dijela koji je izbrušen u konus  $2\phi$
- usmjeravajućeg dijela koji osigurava usmjeravanje svrdla u procesu rezanja
- drške, dijela svrdla koji služi za pričvršćivanje i prijenos okretnog momenta na svrdlo



Slika 4.2. Geometrijski parametri spiralnog svrdla [26]

Svrdlo je alat koji ima dvije glavne rezne oštrice i jednu poprečnu. Na slici 4.3. su prikazane oštrice i kutevi spiralnog svrdla.



Slika 4.3. Presjek spiralnog svrdla [26]

Glavna oštrica nastaje presjekom konvolutne zavojne plohe i stražnje površine koja je dio plohe stošca. Poprečna oštrica nastaje presjekom ploha dvaju stožaca čiji su vrhovi na suprotnim stranama, tj. to je linija koja se dobije presijecanjem dvaju stražnjih površina. Poprečna oštrica čini 15% ukupne dužine oštrice, a na njoj djeluje do 65% aksijalne sile ovisno o promjeru svrdla. Kut na poprečnoj oštrici je izrazito negativan i kreće se od  $48-55^\circ$  (tu dolazi do trganja i izbacivanja materijala). Skraćanjem poprečne oštrice poboljšavaju se uvjeti rezanja. Prednja površina je zavojna površina utora po kojoj klizi odvojena čestica. Stražnja površina je površina okrenuta prema površini rezanja. Kut vrha svrdla  $2\varphi$  je kut što ga zatvaraju dvije glavne rezne oštrice. Ovaj kut odabire se prema materijalu koji obrađujemo jer utječe na prednji geometrijski kut  $\gamma$ , stražnji geometrijski kut  $\alpha$  kao i na otpornost jezgre svrdla. S povećavanjem kuta  $2\varphi$  povećava se i otpor rezanja, a samim time su i veća naprezanja svrdla na uvijanje i izvijanje. Kod tvrdih materijala on iznosi  $2\varphi = 120-140^\circ$ , a kod mekših materijala (npr. Al i Cu legure)  $2\varphi = 80-110^\circ$ . [25]

Kut zavojnice utora  $\omega$  je kut između osi svrdla i razvijenog brida utora. Ovaj kut određuje veličinu prednjeg geometrijskog kuta  $\gamma$ . Povećavanjem kuta zavojnice  $\omega$  povećava se kut  $\gamma$ , ujedno se popravljaju uvjeti rezanja, smanjuje moment uvijanja i otpori rezanja. Istovremeno se smanjuje krutost svrdla i trajnost oštrice, pogotovo za svrdla manjeg promjera (slika 4.4). Ovaj kut se bira prema materijalu obratka. Normalni kut zavojnice utora je  $30^\circ$ , dok se za tvrde materijale uzima približno  $40^\circ$ , a za plastične materijale  $13^\circ$ . [25]

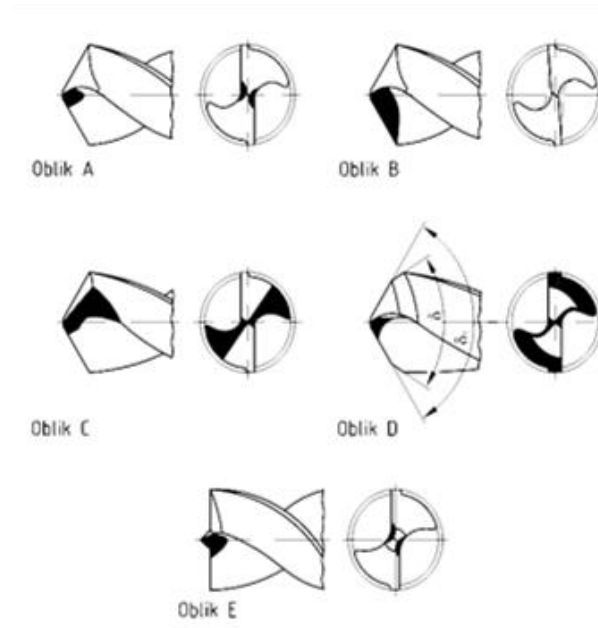


Slika 4.4. Svrdla s različitim kutem zavojnice utora [25]

Kut poprečne oštrice  $\psi$ , kut je što ga zatvara poprečna oštrica s ravninom, koja prolazi glavnom oštricom paralelno sa smjerom osi svrdla. Ovaj je kut mjerodavan da se utvrdi, da li

podbrušene površine imaju traženi oblik, a podbrušeni kutevi ispravne vrijednosti. Kut poprečne oštrice daje veću silu posmaka što sve skupa dovodi do većeg utroška snage.

Moguća je i podjela svrdla prema geometriji oštrice, a prikazana je na slici 4.5.



Slika 4.5. Podjela svrdla prema geometriji oštrice [25]

Navedena svrdla s obzirom na geometriju oštrice imaju različite rezultate djelovanja tijekom bušenja. Oblici A i C neznatno povećavaju silu rezanja, a B omogućuje stabilizaciju glavne oštrice. Oblik D ima jednostruko lomljenu oštricu s ciljem smanjenja presjeka strugotine čime se smanjuje mehaničko i toplinsko opterećenje oštrice, dok oblik E ima zašiljak na vrhu što mu omogućuje centriranje rupe, tj. olakšan je ulaz svrdla u materijal pri čemu su manje vibracije, bolje je vođenje svrdla i kvaliteta površine je veća. [25]

#### 4.1.1. Sile i momenti

Sila rezanja, kojom alat djeluje na obradak pri bušenju, određena je silama koje djeluju na svakoj reznoj oštrici. Kod normalnog, pravilnog rada je kod svih alata poprečni presjek odvojene čestice na svakoj reznoj oštrici jednak te su stoga i sile rezanja jednake. Ako se promatra samo jedna oštrica, moguće je silu rezanja rastaviti u tri komponente. Kod rastavljanja sila kod svrdla, nailazi se na male poteškoće budući da svrdlo osim glavnih reznih oštrica ima i poprečnu reznu oštricu. [26, 27]

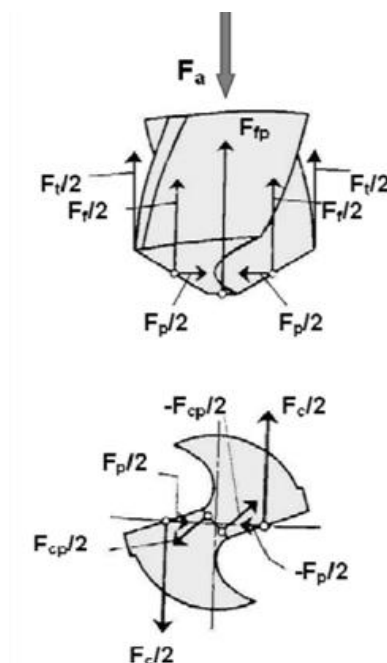
Na glavnoj oštrici javljaju se sljedeće sile (Slika 4.6): [27]

- dvije jednake glavne sile rezanja  $F_c/2$ , ali suprotnog smjera
- dvije jednake i isto usmjerene posmične sile  $F_f/2$
- dvije jednake, ali suprotno usmjerene pasivne sile  $F_p/2$

Na poprečnoj reznoj oštrici javljaju se sljedeće sile: [27]

- dvije jednake, ali suprotno usmjerene glavne sile rezanja na poprečnoj oštrici  $F_{cp}/2$
- posmična sila na poprečnoj oštrici  $F_{fp}$

Uz navedene sile tijekom procesa bušenja, pojavljuju se na svrdlu i sile trenja  $F_t/2$ , koje se generiraju na mjestu dodira svrdla, obrađene površine i odvojenih čestica. Sve sile kojima materijal djeluje u smjeru osi svrdla savladavaju se aksijalnom silom bušenja  $F_a$ , koja se izračunava prema sljedećem izrazu:  $F_a = F_f + F_{fp} + F_t$ . Ispitivanjima je utvrđeno da na silu poprečne oštrice otpada oko 50% ukupne aksijalne sile.



Slika 4.6. Sile rezanja koje djeluju na svrdlo [26]

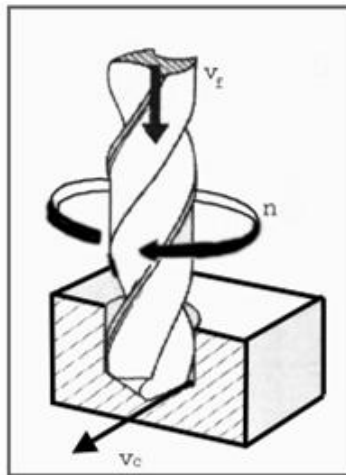
Ukupni okretni moment  $M_u$  kojim je opterećeno spiralno svrdlo se sastoji od momenta  $M_{Fc}$  uslijed glavnih sila rezanja  $F_c$  (iznosi oko 80 % ukupnog momenta), momenta  $M_{Fcp}$  izazvanog glavnim silama rezanja  $F_{cp}$  koje se generiraju na poprečnoj oštrici (10%) i momenta  $M_{Ft}$  od sile trenja  $F_t$  koje djeluju na cilindričnim rubovima svrdla pa proizlazi da je: [25]

$$M_u = M_{Fcp} + M_{Ft}$$

Poznavanje vrijednosti sila i momenata služi za određivanje i proračunavanje čvrstoće svrdla jer je svrdlo opterećeno s jedne strane okretnim momentom, a s druge strane silama koje djeluju u njegovom aksijalnom smjeru, tj. istodobno je napregnuto na torziju i tlak. Osobito je važno odrediti dozvoljeni moment kod većih dubina bušenja, gdje zbog male krutosti svrdla i opasnosti od zaglavlivanja odvojenih čestica u utorima svrdla može doći do takvog dinamičkog naprezanja, koje dovodi do loma alata. Zato se uvijek računa dozvoljeni moment, kod kojeg neće doći do loma svrdla. [25, 27]

#### 4.1.2. Parametri obrade

Jedan od ciljeva kod procesa odvajanjem čestica je da kod obrade nekog materijala alat što duže traje. To znači da bi kod odabira brzine rezanja bilo najprihvatljivije izabrati onu brzinu kod koje će produktivnost proizvodnje biti najveća. Najvažniji parametri kod postupka bušenja (slika 4.7) su glavna brzina rezanja, posmična brzina i dubina rezanja. [25, 26]



Slika 4.7. Shematski prikaz bušenja spiralnim svrdlom pri čemu je: [26]  
 $v_f$  – posmična brzina rezanja,  $n$  – broj okretaja svrdla,  $v_c$  – brzina rezanja

Dubina rezanja pri bušenju u punom materijalu iznosi:  $a_p = \frac{D}{2}$ .

Posmak  $f$  je put koji obavi svrdlo u pravcu osi alata za jedan okret alata.

$$f = f_z \cdot z \quad \text{gdje je} \quad \begin{array}{l} f_z - \text{pomak za jednu oštricu} \\ z - \text{broj oštrica (za svrdlo } z = 2) \end{array}$$

Posmična brzina  $v_f$  ili posmak u jedini vremena računa se iz poznatog posmaka i broja okretaja svrdla:  $v_f = f \cdot n = f_z \cdot z \cdot n$ .

Pri bušenju dubokih provrta potrebno je zbog otežanog odvođenja odvojene čestice i smanjene krutosti svrdla s povećanjem dubine bušenja, smanjiti posmak. Osim toga potrebno je kod dubokih provrta povremeno izvlačiti svrdlo radi čišćenja njegovih utora tj. radi izbacivanja odvojenih čestica. Izbor posmaka uglavnom se vrši s obzirom na otpornost elemenata mehanizma za posmično gibanje, stabilnost sustava alat - alatni stroj – obradak. Navedeni mogući kriteriji za izbor veličine posmaka pri bušenju spiralnim svrdlom ujedno su i faktori koji ograničavaju njegovu veličinu. [25]

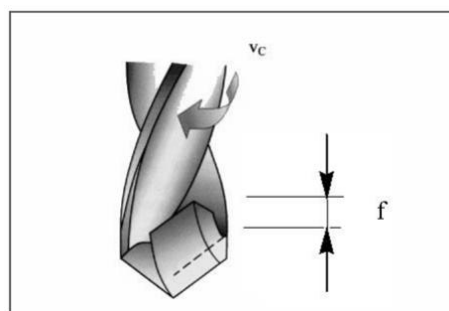
Važno je pojasniti i točno definirati pojam brzine rezanja. Poznato je da svrdlo vrši složeno gibanje, tj. okreće se i istovremeno aksijalno pomiče. Okrećući se, njegove oštrice zahvaćaju materijal i režu ga u obliku strugotine. Brzina kojom se pokreće oštrica nije brzina rezanja. To bi bilo točno kada bi se oštrice svrdla gibale pravocrtno. Međutim, budući se oštrice svojim položajem prostiru od središta prema rubu, pri okretanju neke će točke imati nejednoliku brzinu. Prema tome, za brzinu rezanja usvojena je ona brzina kojom se pokreću krajnje točke na oštricama svrdla, odnosno pod pojmom brzine rezanja podrazumijevamo obodnu brzinu rezanja najvećeg promjera svrdla. Drugim riječima, brzina rezanja (slika 4.8) je različita u pojedinim segmentima rezne oštrice svrdla. U osi svrdla brzina je jednaka nuli, a na obodu je maksimalna. Kao brzina rezanja uvijek se uzima maksimalna brzina jer ona određuje vijek trajanja svrdla.[25]

Brzina rezanja  $v_c$  izračunava se prema izrazu:  $v_c = d \cdot \pi \cdot n$

Prošireni eksperimentalni izraz za brzinu rezanja pri bušenju, koji uzima u obzir sve glavne faktore obrade ima oblik: [26]

$$v_c = \frac{C_v \cdot d^x \cdot k_0}{T^m \cdot f^y} \quad \text{gdje su:}$$

$C_v, x, y$  i  $m$  – konstante ovisne o materijalu obratka  
 $d$  – promjer svrdla, [mm]  
 $f$  – posmak [mm/okr]  
 $T$  – vrijeme trajanja alata [min]  
 $k_0$  – koef. smanjenja brzine pri povećanju dubine odnosa  $l/d$



Slika 4.8. Shematski prikaz brzine rezanja  $v_c$  i posmaka  $f$  [26]



U svakoj proizvodnji se nastoji što više smanjiti operativne troškove. Upravo na njih djeluje i posmak koji je vrlo važan faktor kod procjene troškova i vremena potrebnog za provedbu određene obrade. Svojstvo bušivosti materijala se može poistovjetiti s posmakom; s jedne strane se bušivost odnosi na lako ili teško prodiranje svrdla kroz materijal, dok s druge strane, stopa posmaka pokazuje koliko to svrdlo sporo ili brzo radi. Bušenje kamena se izvodi različitim tehnikama odnosno svrdlima. Rotacijska udarna svrdla se koriste kod vrlo tvrdih kamena, rotacijska svrdla za drobljenje kod srednje tvrdih, a rezna svrdla kod mekih vrsta kamena. [28]

Postupak ovisi o operacijskim varijablama i svojstvima materijala. Operacijske varijable su promjenjivi parametri procesa: brzina rotacije, pogonska snaga, frekvencija udara (?) i ispiranje (upotreba SHIP-a). Nasuprot tome, svojstva obrađivanog kamena i geološki uvjeti su nepromjenjivi parametri procesa. Optimalna vrijednost posmaka, izbor odgovarajuće bušilice, petrografska struktura kamena, njegova tvrdoća, otpornost na abraziju i mehanička svojstva su činjenice koje je potrebno ispitati prvenstveno u laboratoriju. [28]

Posmak je stopa prodiranja oštrice svrdla u kamen u određenom vremenskom razdoblju, a obično se izražava u m/min. Postupak bušenja i njegovo izvođenje ovise prvenstveno o tehničkim karakteristikama procesa bušenja i svojstvu bušivosti kamena. Bitno je precizno odrediti svojstva obrađivanog kamena i prema njima odabrati svrdlo kako bi se postigao maksimum iskorištenja bušilice. [28]

## 4.2. Bušivost

Bušivost ukazuje na lako ili otežano prodiranje svrdla u materijal pa dobra procjena bušivosti rezultira dobrom procjenom tvrdoće obrađivanog materijala.

$$tvrdoća = \frac{1}{bušivost}$$

Bušivost kamena je prema Somerton-u, Esfandiari-u i Sinhhal-u (1969.) definirana kao volumen kamena izbušen po jedinici uložene energije. Overton (1973.) definira bušivost kao brzinu kojom je moguće prodirati u kamen određene tvrdoće. Od nastanka samog svrdla kao alata, proučava se odnos između metala (svrdla) i obrađivanog kamena, a s ozbirom na veliku složenost istog, istraživanja se i danas nastavljaju (Wu, Hareland and Rashidi, 2010.). Bušivost je pokazatelj složenosti procesa bušenja, učinka i troškova bušenja prema Albertin- u,

Petmecky-u i Jay-u (2003.). Kroz povijest bušenja su primjenjivane različite metode za određivanje bušivosti u pogledu drugih parametara bušenja. [8]

#### 4.2.1. Povijesni razvoj mjerenja bušivosti [8]

Head je 1951. godine proveo ograničen broj ispitivanja na osnovu kojih je nastojao utvrditi vezu između bušivosti i tvrdoće. Zaključio je da se na osnovu njegovih rezultata, takva veza nije mogla definirati. Klasificirao je geološke tvorevine samo na temelju relativne učinkovitosti prema kojoj su se te tvorevine mogle bušiti. Dokazao je da je klasifikacija u skladu s tadašnjim ispitivanjima bušenja. Bušivost se tako pokazala više ovisna o načinu na koji su tvrdi kristali međusobno povezani unutar materijala, nego o tvrdoći.

Bušivost se ne može mjeriti parametrima alata, ali se može procijeniti na temelju drugih parametara bušenja prema Cheniany-ju, Khoshro-u i Shahriar-u (2010.). Ti parametri su podijeljeni u dvije kategorije, kontrolirani i nekontrolirani (upravljivi i neupravljivi) parametri. Vrsta svrdla i njegov promjer, brzina vrtnje, pogonska snaga i upotreba SHIP-a su parametri koje se može kontrolirati, dok su svojstva kamena i geološki uvjeti nekontrolirani parametri.

Somerton je 1959. U laboratorijskim uvjetima, kontrolirajući posmak istraživao kako čvrstoća kamena i stupanj trošenja alata utječu na brzinu bušenja. Također je analizirao reznu oštricu kako bi odredio karakter loma u materijalu i usporedio ih se drugim metodama loma. Izveo je formulu za posmak koja obuhvaća posmak  $f$ , promjer svrdla  $d$ , brzinu vrtnje  $N$ , silu primijenjenu na svrdlo  $F$ , čvrstoću kamena  $S$ , konstantu  $C$  i eksponent  $a$  koji je eksperimentalna vrijednosti.

$$f = C \cdot d \cdot N \cdot \left(\frac{F}{d^2 \cdot S}\right)^a$$

Gstalder i Raynal (1996.) navode kako bušivost ne može biti potpuno definirana samo jednim svojstvom ili testiranjem. Smatrali su da se jednostavnim ispitivanjem, poput Schreiner-ovog testa, može izmjeriti bušivost kamena. Ispitivanja su pokazala da tvrdoća može biti mjera lomne čvrstoće.

Dvornikon je 1964. konstruirao grafičke prikaze i pokušao je izvesti formule koje bi do neke mjere izarzile proces bušenja. Svoj rad je temeljio na Soviet-ovim eksperimentalnim podacima i prijašnjim istraživanjima. Do 1971. je bilo nemoguće izvesti jednu formulu koja bi

u sebi sadržavala sva svojstva koja utječu na operaciju bušenja. Međutim, Markman je tada opisao funkcije koje su kasnije bile dovoljno dobre za inženjerske proračune, a u obzir je uzeo sve najvažnije parametre procesa bušenja i rezanja.

Overton je 1973. predložio dimenzijski izvedenu jednaždbu za bušivost kamena. Nužno je bilo analizirati međusobnu interakciju rotirajućeg svrdla i svojstava kamena. Mnoge od jednažbi su i danas u upotrebi kod rotacijskog bušenja. Jednažba se sastoji od deset mjerljivih varijabli, dva koeficijenta ovisna o svrdlu i dva koeficijenta ovisna o strukturi kamena. Oni parametri koji nisu mjerljivi, određivani su eksperimentalno.

Hongjin zaključuje kako su sva dotadašnja istraživanja izvedena pod pretpostavkom homogene strukture uzoraka kamena. Upravo je suprotno, svi ispitivani uzorci su bili uglavnom heterogeni. 1968. godine Hongjin uvodi statistički pristup za proučavanje bušivosti na osnovu eksperimentalnog promatranja velikog broja uzoraka. Pristup daje kvantitativnu povezanost različitih parametara i svojstava te uzima u obzir heterogenu strukturu uzoraka. Također je predložio empirijsku jednadžbu bušivosti koja statistički varira s dubinom. Generalizira populaciju uzoraka i predstavlja karakteristike pojedinih heterogenih uzoraka. Bušivost se tada može izračunati matematički, bez velikih napora i daje točniji rezultat od grube procjene.

Prasad je 2009. predstavio model u kojem se bušivost opisuje pomoću osam jednostavnih fizičkih, mehaničkih i mikrostrukturnih svojstava. Relevantna svojstva kamena su bila gustoća, poroznost, tlačna čvrstoća, Mohr-ov kut trenja, mineralogija i veličina zrna. Navedena svojstva je bilo moguće dobiti iz već poznatih podataka ili ispitivanjem u komercionalnom laboratoriju. Ustanovljen je raspon vrijednosti od 1 do 8 gdje se 1 označio vrlo meki, a 8 vrlo tvrdi kamen.

#### **4.2.2. Geološki utjecaj na bušivost stijena**

Bušivost nije presudan faktor koji utječe na trošenje alata i opreme, ali je zajedno s brzinom bušenja faktor koji utječe na njihovu učinkovitost. Procjena bušivosti u predviđenim uvjetima stijena može dovesti do opsežnih rizika troškova pa je svakako poželjno biti u mogućnosti što točnije predvidjeti brzine bušenja i trošenje alata. Bušivost kamene mase je određena raznim geološkim i mehaničkim svojstvima. [29]

Trošenje stijena zbog atmosferskih utjecaja ovisi o nekoliko čimbenika:

- količini toplinskih opterećenja kojoj je podvrgnuta površina stijene
- prisutnosti ili odsutnosti vode
- mikrobiološkom djelovanju na ili ispod površine
- količini kemikalija i soli koje uzrokuju raspadanje minerala

Ti čimbenici, međusobnim djelovanjem dovode do slabljenja stijenske površine nakon čega se povećava njihova osjetljivost na eroziju. Ako nastupi takvo oslabljenje površine, vezivo između zrna također slabi, zrna se raspadaju, a na površini postaje vidljiv gubitak volumena. Pogoršanje se može javiti u nekoliko oblika poput ljuštenja, pojave mjehurića, nakupljanja bioloških organizama (alge) i vlage ispod površine, a svi oni snizuju tvrdoću površinskog sloja stijene. Daljnji atmosferski utjecaj na oštećenu površinu utječe na poroznost te mijenja tlačnu čvrstoću i elastičnost stijene. Dakle, mjerenjem tvrdoće površine moguće je procijeniti atmosferski utjecaj i područja slabosti stijene.

Međutim, tri su faktora koje je nužno konstantno kontrolirati i uzeti u obzir. Prvo, povećanjem atmosferskog utjecaja može doći do povećanja površinske hrapavosti što dalje utječe na mjerenje npr. tvrdoće metodom odskoka. Drugo, kao posljedica se može pojaviti i ojačanje površinskog sloja putem kaljenja. Cementiranjem se mogu elementi poput željeza i magnezija nataložiti ispod površine i tako promijeniti njenu strukturu. Treće, različita povezanost ravnina kod sedimentnih stijena može dovesti do djelomičnih oštećenja pod atmosferskim utjecajem. [30]

Brzina bušenja ovisi o mnogim geološkim svojstvima kamena, a najvažniji su spojna stijenska masa, anizotropija stijena, stupanj uključina u mikrostrukturi, poroznost i kvaliteta cementiranja, stupanj hidrotermalne razgradnje. Trošenje oštrice svrdla se povećava s ekvivalentom sadržaja kvarca kojeg sadrže minerali skloni trošenju. Za različite vrste kamena ustanovljene su različite veze s ekvivalentom sadržaja kvarca. S druge strane, npr. kod pješčenjaka je trošenje svrdla ovisno i o poroznosti te kvaliteti cementiranja. [29]

Bušivost je izraz koji se koristi u izgradnji, opisuje utjecaj niza parametara na brzinu bušenja i trošenje oštrice svrdla. Prvenstveno je uvjetovana parametrima stroja i korištenog alata. Osim tehničkih parametara, na konačni učinak postupka bušenja, uključujući i trošenje posebice utječu i geološka svojstva. Specifične karakteristike kamenog materijala i stijenske mase se mogu djelomično izraziti pomoću mehaničkih svojstava kamena. Međutim, stanje stijenske mase također veoma ovisi o geološkoj povijesti stijene, vremenskim uvjetima, hidrotermalnom razlaganju i diskontinuitetima unutar strukture. Posljednji važan faktor koji

utječe na bušivost materijala je sam radni proces. Naime, mirne obradne operacije i stalno održavanje opreme doprinose uspješnom učinku bušenja. [29]

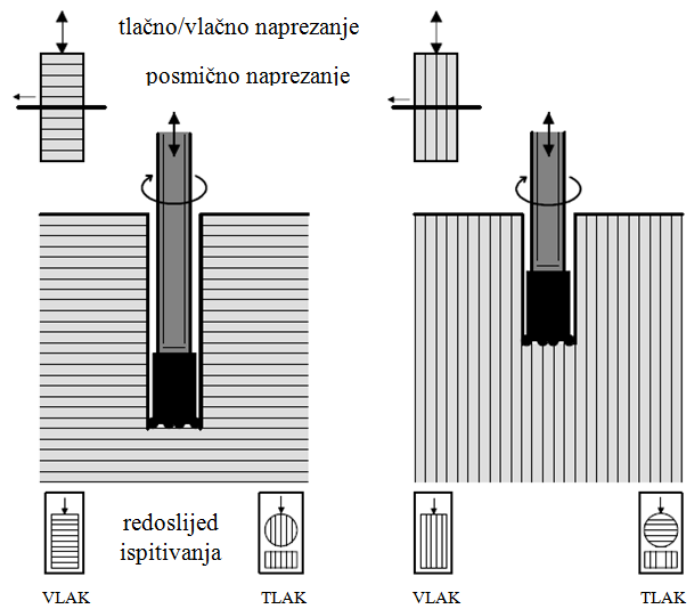
Najčešće korištena mehanička svojstva stijena su tlačna čvrstoća, Young-ov modul elastičnosti i vlačna čvrstoća. Izvedeno svojstvo, omjer između tlačne i vlačne čvrstoće je često definiran kao žilavost (ili lomljivost) kamenog materijala. Mnogi autori su imali tendenciju da jedno ili više izvedenih svojstava uzmu kao glavni parametar bušivosti (Schimazek i Knatz 1970., Wanner 1975., Habenicht i Gehring 1976., Blindheim 1979., Movinkel i Johannessen 1986.). Opsežno istraživanje pokrenuto je od strane ISRM 1985. godine kako bi se ustanovila srednja vrijednost svojstava bušenih vrsta kamena. [29]

Ispitivanjem bušenja je postalo očito da je osim tlačne i vlačne čvrstoće, i posmična čvrstoća kao elastična karakteristika materijala od presudne važnosti. Točnije, tzv. specifični rad razaranja  $W_z$  je uveden (Thuro 1996.) kao mjera za količinu energije potrebna za razaranje uzorka kamena. Drugim riječima se može opisati kao rad koji je potrebno uložiti da dođe do stvaranja pukotine u kamenu. Specifični rad razaranja se pokazao kao vrlo značajni parametar za opis procesa bušenja. Za razliku od navedenih, korelacije između konvencionalnih mehaničkih svojstava stijena, tlačne i vlačne čvrstoće, Young-ovog modula i žilavosti te stope bušenja pokazale su manju važnost prilikom opisa procesa (Thuro i Spaun, 1996.). [29]

Iako mehanička svojstva omogućuju predviđanje učinka procesa bušenja, geološki utjecaji su još više odlučujući za brzine bušenja i životni vijek alata. Neki od najvažnijih geoloških svojstava su: anizotropija (orijentacija diskontinuiteta), razmak između diskontinuiteta, mineralni sastav (ekvivalentni sadržaj kvarca) i volumen pora (poroznost). Utjecaj hidrotermalne razgradnje je vrlo često isti kao i atmosferski utjecaj na stijensku masu.

Naravno, svojstva kamena i stope bušenja su također uvelike ovisni o orijentaciji ravnina s obzirom na smjer ispitivanja ili bušenja. Kada je smjer bušenja pod pravim kutem s obzirom na orijentaciju folijacija (ravnomjerni raspored planarnih strukturnih elemenata), materijal je komprimiran pod pravim kutem, ali presječen paralelno s obzirom na njega. Iako se pukotine razvijaju radijalno s obzirom na kompresiju, radi se o slučaju kada se postižu najviše brzine bušenja zbog povoljne orijentacije folijacija. Bušenje se kontrolira pomoću posmične čvrstoće obrađivanog materijala. Minimalni specifični rad razaranja uzrokuje strugotine velikih površina i najviši učinak samog procesa bušenja (slika 4.9). Ako je os svrdla orijentirana paralelno s obzirom na folijacije, kompresija je također paralelna, dok se smicanje odvija pod pravim kutem. Jasno je da se razvija manje pukotina zbog veće čvrstoće pod pravim kutem s

obzirom na folijacije. Proces bušenja je kontroliran pomoću vlačne čvrstoće paralelno s folijacijama, strugotine su malih veličina i učinak procesa je minimalan. Sigurno je, da su u slučaju paralelne orijentacije svojstva kamena najučinkovitija i brzina bušenja je mala. [29]



Slika 4.9. Orijentacija ravnina s obzirom na smjer bušenja [29]

Naravno, brzine bušenja su također ovisne i o razmaku diskontinuiteta unutar stijenske mase. Diskontinuiteti su fizički prekidi u stijeni, odnosno skup oslabljenih ravnina koje često dovode do prijevremenog nastanka pukotina. Utjecaj diskontinuiteta nije uočljiv ako je njihov međusobni razmak veći od dimenzije bušotine, odnosno svrdla. Kada svrdlo naiđe na spoj diskontinuiteta, brzina bušenja se dvostruko poveća. Problem se javlja zbog nestabilnosti tog spoja koja uzrokuje propadanje provrta. Na taj način, napori uloženi u brže bušenje provrta u zonama rasjeda postaju beskorisni. [29]

Zapravo, ne postoji niti jedno fizikalno svojstvo kojim se može odrediti i opisati tvrdoća kao što se to može pomoću jednoosne tlačne čvrstoće. Mnogo petrografskih svojstava se uzimalo u obzir za predviđanje trošenja alata i bušivosti prema Howarth-u i Rowlands-u 1987. Međutim, takve strukturne metode bile su dugotrajne i na taj način neprimjenjive u praksi. Jasno je, da je trošenje alata uglavnom posljedica minerala unutar strukture koji ima veću tvrdoću od metala. Metal prema Mohs-ovoj ljestvici ima tvrdoću 5,5 dok mineral kvarca ima tvrdoću čak 7. Kako bi se ustanovio udio kvarca, potrebno je uzeti u obzir sve minerale koje sadrži uzorak i usporediti njihova svojstva s abrazivnošću i tvrdoćom kvarca. Stoga je, svaki udio minerala pomnožen s relativnom Rosiwal-ovom abrazivnošću u kvarcu što je vidljivo u formuli:

$$equ = \sum_{i=1}^n A_i \cdot R_i$$

gdje su:

A – udio minerala [%]  
R – Roiswalova abrazivnost [%]  
n – broj minerala

Ova metoda određivanja ekvivalenta sadržaja kvarca je široko rasprostranjena među proizvođačima alata, inženjerima i geolozima. Životni vijek oštrice alata je ovisan o udjelu kvarca u obrađivanom kamenu. Stupanj trošenja uglavnom raste s povećanjem ekvivalenta sadržaja kvarca. [29]

Za pješčenjake i druge stijene sklone razlaganju je povoljnije umjesto ekvivalentnog sadržaja kvarca u obzir uzeti svojstvo poroznosti. Poroznost je funkcija gustoće suhog materijala, a kreće se u rasponu od idealno zbijenog materijala do potpuno razgrađenog bez veziva. Ustanovljena je dobra veza između poroznosti kamena i njegovih tehničkih svojstava poput trošenja alata i brzine bušenja te mehaničkih svojstava poput tlačne čvrstoće i rada razaranja. Strukturu materijala s obzirom na stupanj poroznosti je moguće vidjeti pomoću elektronskog mikroskopa.

Jasno je da se, niti u laboratoriju, niti samo na terenu, geološki ili iskustveno, niti konstrukcijom opreme i operacijama ne može ustanoviti jednoznačna formula za bušivost materijala. Zadovoljavajuće je da se uz pomoć već otkrivenih veza između mehaničkih i petrografskih svojstava stijena može predvidjeti brzina bušenja i stupanj trošenja alata. Usprkos svim poznatim svojstvima kamena i dalje se nailazi na različite geološke pojave koje se ne mogu predvidjeti niti se unaprijed može znati njihov utjecaj na proces i svojstva. [29, 30]

## 5. TROŠENJE ALATA

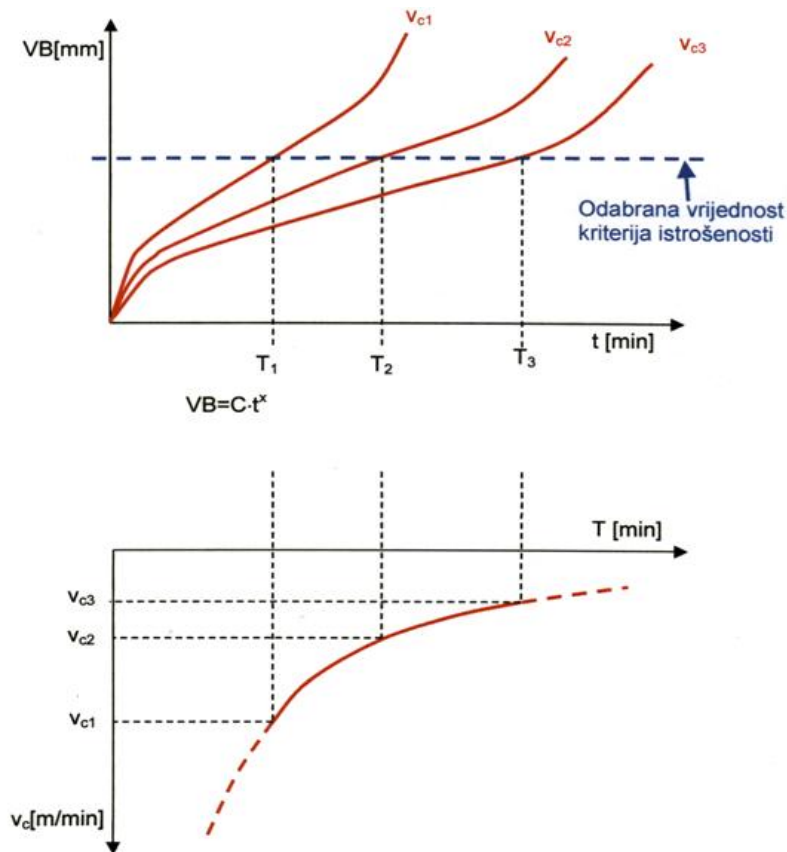
Trošenje alata je neizbježan i ireverzibilan proces koji utječe na sile rezanja i kvalitetu obrađivane površine. Dinamika trošenja alata ovisi o više parametara, od čega su među najznačajnijim parametri obrade i tvrdoća obrađivanog materijala. Kod razvoja takvih alata se nastoji postići čim duži životni vijek kako bi vrijeme eksploatacije bilo što veće. Kod bušenja je, za vrijeme rada, svrdlo podvrgnuto mehaničkim, toplinskim i kemijskim opterećenjima koja uzrokuju promjenu geometrijskog oblika oštrice tj. njezinu istrošenost.

Pri bušenju se prvenstveno troše rezni bridovi te nakon nekog vremena se istroši svrdlo. Trošenje je rezultat trenja stražnje površine alata o površinu rezanja, odvojene čestice o prednju površinu u pravcu ruba svrdla te ruba alata o površinu provrta i gnječenja poprečne oštrice. Parametri koji najviše utječu na postojanost svrdla su posmak i brzina rezanja.

Uzroci koji najčešće dovode do trošenja su: [25]

- plastična deformacija alata uslijed djelovanja temperature
- mehaničko trošenje alata na prednjoj i stražnjoj površini
- pucanje oštrice uslijed promjenjivog opterećenja
- odvajanje ili lom pojedinih dijelova alata

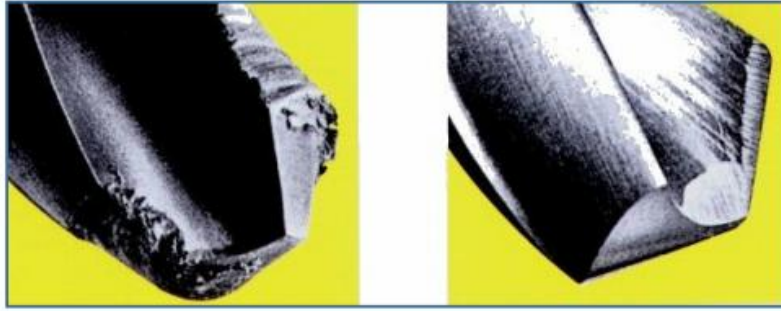




Slika 5.1. Prikaz trošenja alata Tylor-ovom metodom [26]

Na slici 5.1. Prikazan je tijek trošenja alata od početka njegove uporabe do loma ili katastrofalnog trošenja. Područje od 0 do  $T_1$  predstavlja početak trošenja alata okarakteriziran razmjerno naglim porastom parametara trošenja. Isto se područje često naziva i područjem uhodavanja alata. Područje između  $T_1$  i  $T_2$  je područje uporabe odnosno eksploatacije. Alat se u tom području općenito troši manjom dinamikom. Područje između  $T_2$  i  $T_3$  je područje gdje se trošenje naglo povećava i dolazi do loma oštrice.

Zbog njegove specifične geometrije, duž oštrice svrdla razvijaju se različite brzine rezanja ovisno o udaljenosti od vrha svrdla odnosno poprečne oštrice. Na mjestu poprečne oštrice dolazi do gnječenja materijala pošto se ne ostvaruje proces rezanja odnosno stvaranje odvojene čestice. Pomakom od sredine svrdla brzina se povećava pa je tako na obodu svrdla maksimalna brzina rezanja te se tu stvara i najviše odvojene čestice, a samim time i dolazi do najvećeg iznosa trošenja alata.



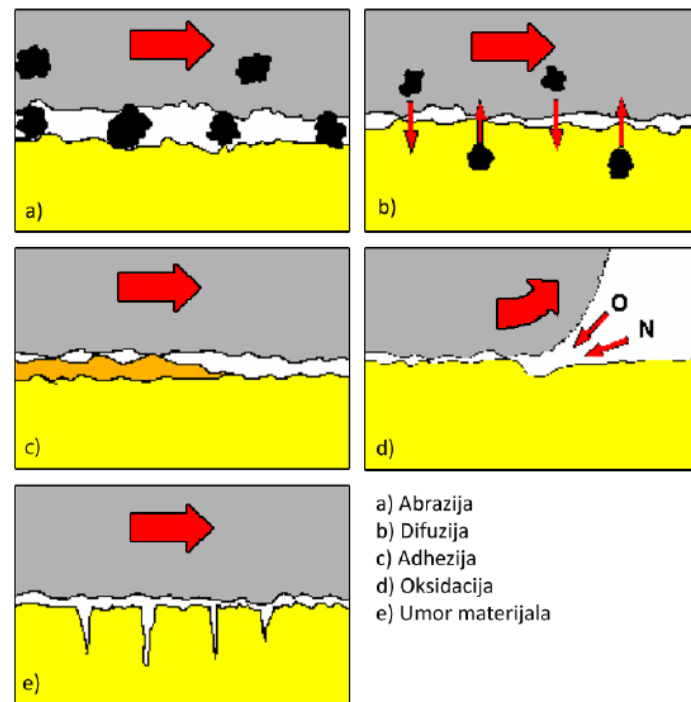
Slika 5.2. Oblici istrošenosti svrdla [25]

Slika 5.2 prikazuje tipične oblike trošenja površine svrdla tj. trošenje stražnje i prednje površine, trošenje kraja glavne oštrice. U slučaju trošenja rezne oštrice, dolazi do naglog povećanja glavne sile rezanja, dok se posmična sila neznatno povećava. U slučaju trošenja poprečne oštrice, brži je porast posmične sile, a u manjem stupnju se povećava glavna sila rezanja. Kod trošenja na kutevima nastaje povećanje momenta i posmične sile. Trošenje stražnje površine svrdla je neravnomjerno, na obodnom dijelu je najveće, a u blizini poprečne oštrice je najmanje. [25]

### 5.1. Uzroci i mehanizmi trošenja

Svaki postupak obrade kamena zahtijeva alat određenih svojstava. Tako se na primjer kod drobljenja kamena koriste posebni čelici otporni na abraziju i druge mehanizme trošenja, dok se kod bušenja koriste WC/Co cementni karbidi. Pri obradi kamena materijal oštrice alata podvrgnut je vrlo teškim eksploatacijskim uvjetima, a jedan od značajnijih problema je promjenjiva struktura kamena. Za dobar izbor materijala alata i njegovu otpornost na trošenje potrebna je prikladna karakterizacija vrste kamena. Relativno tvrdi kamen uzrokuje abrazivno trošenje kod alata koji su izloženi dugotrajnijim procesima obrade. Materijal alata je podložan različitim vrstama minerala pri visokim opterećenjima u ekstremnim uvjetima rada. Pri bušenju je svrdlo izloženo nekolicini mehanizama trošenja s obzirom na promjenjivu strukturu kamena i svojstva određenih minerala. [12]

Uzroci trošenja alata kojima je alat tijekom obrade izložen mogu se povezati sa sljedećim glavnim vrstama naprezanja: mehaničkim, toplinskim, abrazivnim i kemijskim. Pojedinačnim djelovanjem ili interakcijom spomenutih naprezanja nastaje nekoliko dominantnih procesa trošenja. Mehanizmi trošenja prikazani na slici 5.3 su abrazija, difuzija, oksidacija, adhezija i zamor materijala. Udjeli mehanizama trošenja u samom procesu trošenja nisu uvijek isti te ovise o čimbenicima kao što su: vrsta obrađivanog materijala, materijal i oblik alata. [28]



Slika 5.3. Mehanizmi trošenja [28]

Navedeni mehanizmi trošenja mogu se podijeliti u dvije skupine:

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

Oblici trošenja koji se mogu pojaviti prilikom obrade kod reznih alata su: trošenje stražnje površine, kratersko i zarezno trošenje, plastična deformacija, naljepak, toplinska i uzdužna napuknuća, razgradnja oštrice, lom oštrice. [28]

1968. je Montgomery kao najvažniji mehanizam trošenja objasnio ljuštenje uzrokovano zamorom materijala oštrice svrdla izrađenog od WC/Co cementnog karbida. Kasnije je još otkrio kako je stupanj istrošenosti svrdla pri obradi granita, ovisna o tvrdoći karbida, dok utjecaj tvrdoće kamena nije istraživao. Larsen –Basse je razvio Montgomery-jevu teoriju i predložio podjelu cjelokupnog mehanizma trošenja na tri razine:

- (1) makroskopsku razinu koja zahvaća veći dio komponente pri svakoj vrsti trošenja
- (2) mikroskopsku razinu koja zahvaća onaj dio materijala koji je obuhvaća znatan udio zrna

(3) razinu koja zahvaća samo pojedine karbide zrna ili područje veziva.

Bailey and Perrot su utvrdili da je termalni umor (umor zbog izloženosti visokim temperaturama) vrlo važan mehanizam trošenja kod rotacijskih obrada abrazivnih i neabrazivnih minerala. Uz to su zaključili da abrazija i površinski umor materijala uzrokuju nastanak i propagaciju (razvoj) pukotina unutar zrna. [12]

### 5.1.1. Najčešći mehanizmi trošenja

Uzroci trošenja odnosno mehanička, toplinska i kemijska naprezanja uzrokuju različite mehanizme trošenja, odnosno razvijanje triboloških procesa na reznom dijelu alata. Mehanizmi trošenja su abrazija, adhezija, difuzija, oksidacija i zamor materijala. [28, 32]

Abrazijsko trošenje je uvijek prisutno, a njegov je utjecaj dominantan kod nižih temperatura obradnih procesa, gdje prevladavaju efekti mehaničkog naprezanja. Ovaj se proces smatra glavnim procesom trošenja na stražnjoj površini alata, a njegovo djelovanje utječe i na druge oblike trošenja. Uvjet nastajanja abrazivnog trošenja je omjer tvrdoća abrazivnih čestica i alata, koji mora biti barem 4.5, dok abrazijskog trošenja nema u uvjetima približno istih tvrdoća. Omjer tvrdoća kao i veličina abrazivnih čestica glavni su utjecajni faktori na intenzitet djelovanja ovog procesa.

Adhezijsko trošenje se uglavnom javlja pri nižim temperaturama i manjim brzinama rezanja, a uzrokovano je međusobnim afinitetom materijala i obratka u određenim temperaturnom području i mehaničkom opterećenju silama rezanja. Ovaj je proces prisutan na sučeljima alata s obratkom i odvojenom česticom, a utječe na trošenje prednje površine alata, vrha alata i pomoćne oštrice. Njegovo se djelovanje povezuje sa pojavom naslage (naljepka). Kako kamen i svrdlo nemaju isti afinitet u određenom temperaturnom području, ovaj mehanizam trošenja se ne pojavljuje pri bušenju kamena.

Difuzijsko trošenje je toplinski aktiviran proces koji je prisutan pri višim temperaturama obrade i čije se djelovanje povezuje s kemijskim opterećenjima uvjetovanim međusobnim afinitetom materijala alata i obratka. Ovaj se proces smatra glavnim uzrokom kraterskog trošenja, ali se također ne pojavljuje pri obradi kamena bušenjem.

Oksidacijsko trošenje se također smatra toplinski aktiviranim procesom koji kod nekih alatnih materijala pri povišenim temperaturama obrade uz prisustvo zraka stvara okside različitih

svojstava. Djelovanjem oksidacijskog trošenja nastaju žljebovi na oštrici alata u zonama gdje završava zahvat alata s obratkom. Kod bušenja kamena, zbog različitih afiniteta materijala, ne dolazi do ovakvog trošenja.

Trošenje uslijed umora posljedica je periodički promjenjivih mehaničkih i toplinskih opterećenja alata. Ovaj oblik trošenja je više izražen kod prekidnih obrada, gdje uslijed prekidnog reza istovremeno dolazi do dinamičkih mehaničkih i toplinskih opterećenja. Međutim, mehanički umor može nastati i kod kontinuiranih obrada kada, uslijed većih posmaka ili male tvrdoće alatnog materijala, nastupe statička opterećenja na oštrici koja sama po sebi nisu dovoljna da bi izazvala lom alata. Djelovanje ovog oblika trošenja odražava se krhanjem oštrice i pojavom pukotina najčešće paralelnih s oštricom ili lomom alata.

Nehomogena struktura, a time i promjenjiva tvrdoća kamena utječu na sile rezanja tijekom bušenja, a time i na dinamiku trošenja alata. Kao rezultat, tijekom obrade mogu se pojaviti odlamanje i ostala oštećenja obrađivanog provrta.

## 5.2. Trošenje svrdla i postojanost alata

Bušenje se kao kontinuirana obrada razlikuje od sličnih postupaka po zahvatu u kojem se istovremeno nalaze obje oštrice svrdla. Intenzitet trošenja svrdla se u praksi pokazao dosta neujednačenim, a razlike u vijeku trajanja povezuju se s nehomogenošću materijala obratka i alata, neujednačenom protoku SHIP-a i nesimetričnosti oštrica kao neizbježne posljedice u proizvodnom postupku svrdla.

Postojanost alata je najčešće definirana vremenom koje alat može provesti u obradi prije nego se istroši do određenog stupnja istrošenosti. Međutim, kod određenih bi obrada bilo prikladnije postojanost definirati brojem komada, odnosno zbrojem površina koje se određenim tehnološkim uvjetima mogu formirati. U bušenju, postojanost bi bilo praktično definirati brojem provrta pri zadanim parametrima obrade. Međutim, kako razmatrane mogućnosti nisu univerzalne, postojanost alata je općenito još moguće definirati duljinom puta u smjeru glavnog ili posmičnog gibanja. Kod postupaka bušenja postojanost je najčešće izražena upravo duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja. [28]

Alat doseže svoj korisni vijek trajanja u trenutku kada više ne može obavljati zahtijevanu funkciju. Određivanjem kriterija istrošenosti kao vrijednosti jednog parametra istrošenosti ili pojave nekog fenomena istrošenosti, stvaraju se pretpostavke za određivanje postojanosti,

odnosno preostalog korisnog vijeka alata. Time se u zadanim granicama povjerenja predviđa sposobnost alata da postigne zahtijevane parametre obrade, odnosno trenutak njegove zamjene. [28]

Sustavi nadzora procesa obrade se mogu podijeliti u dvije skupine: direktne i indirektne. Kod direktnog sustava nadzora trošenje alata se prati mjerenjem oblika trošenja reznog dijela alata. U tom slučaju se najčešće koriste kamere za vizualno kontroliranje ili laserski senzori za mjerenje napredovanja istrošenosti. Nedostatak takvog sustava je nužno zaustavljanje procesa i odvajanje alata od obrađivanog materijala. Indirektni nadzor procesa karakterizira kontinuirano praćenje signala sila, vibracija, akustične emisije i sl. Izdvojene značajke iz signala se analiziraju pomoću odgovarajućih algoritama i prikazuju u uzajamnoj vezi s trošenjem. Indirektnim sustavom se dobivaju manje pouzdani rezultati, međutim prednost im je kontinuiran on-line nadzor.

### **5.2.1. Utjecaj parametara obrade na trošenje i postojanost alata [28]**

Brzina rezanja se općenito smatra najznačajnijim parametrom obrade. Eksperimentalno je potvrđeno da porast brzine rezanja značajno utječe na porast temperature alata, dok istovremeno u odnosu na posmak i dubinu rezanja nema značajniji utjecaj na porast ostalih komponenti sila rezanja. Iz toga proizlazi da brzina rezanja najvećim dijelom doprinosi postupnom porastu trošenja alata.

Posmak je drugi parametar obrade koji po svom značaju utječe na trošenje. Povećanjem posmaka značajno se utječe na porast sila rezanja, a time i na mehanička opterećenja alata koja većim dijelom neposredno uvjetuju ranije opisane oblike trošenja. Variranjem posmaka tijekom obrade moguće je prema nekim autorima značajno povećati postojanost alata.

Dubina rezanja, odnosno dubina bušenja, najmanjim dijelom utječe na trošenje. Kod nekih obrada porast dubine rezanja gotovo linearno utječe na porast mehaničkog opterećenja, dok kod većih dubina bušenja, uslijed otežanog odvođenja, odvojene čestice može imati negativan utjecaj i na toplinska opterećenja.

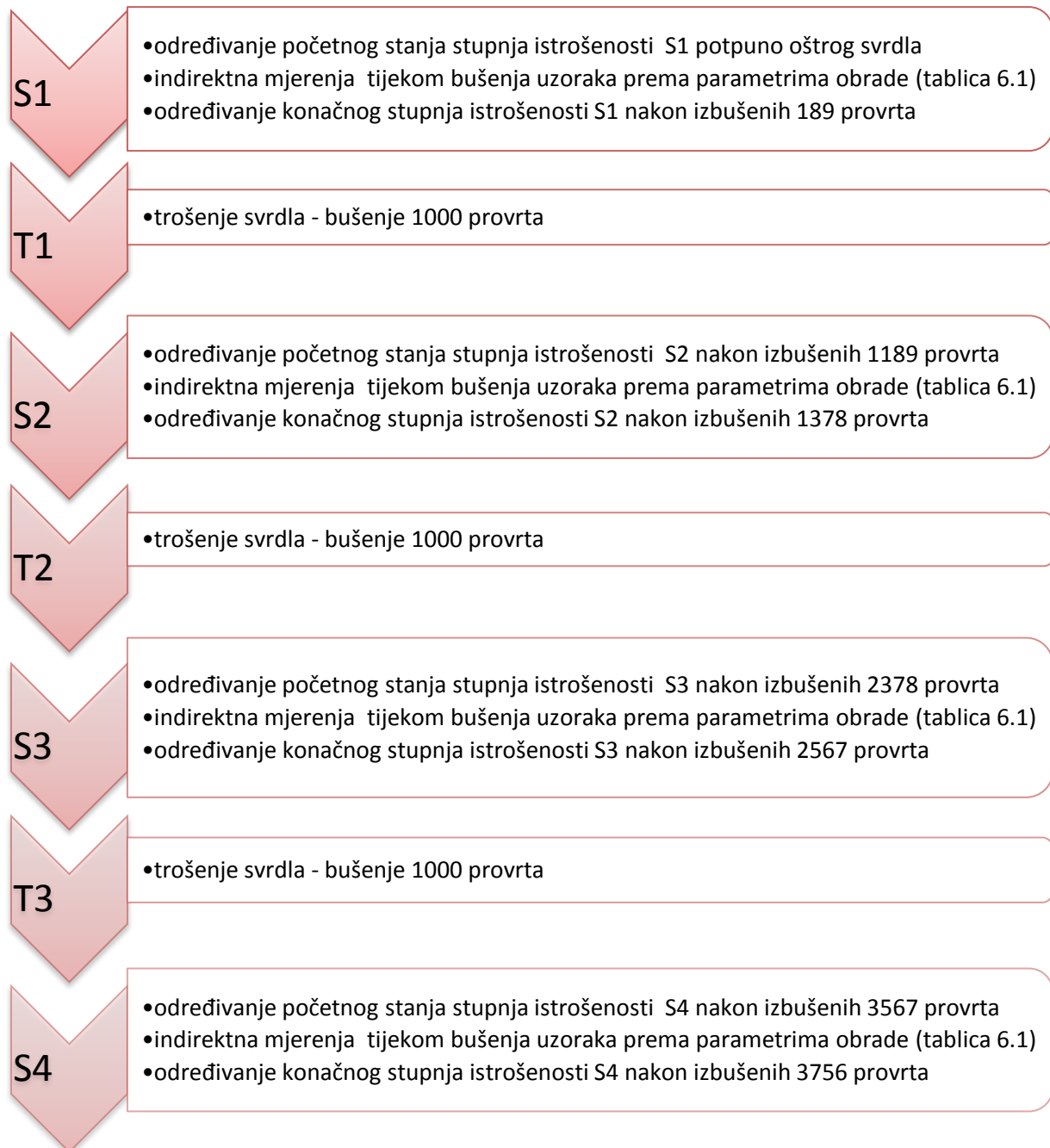
## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada proveden je plan pokusa tijekom procesa bušenja u cilju analize utjecaja tvrdoće kamena na značajke izdvojene iz signala sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora. Plan pokusa je proveden korištenjem svrdla istupljenog na četiri različita stupnja istrošenosti, kojima su bušeni kameni uzorci različitih tvrdoća (K1, K2 i K3).

Eksperiment je proveden u nekoliko faza u kojima su bušeni uzorci kamena različitih tvrdoća potpuno oštrim svrdlom različitom kombinacijom parametara obrade. Parametri obrade birani su prema preporukama proizvođača svrdla i ograničenjima stroja (tablica 6.1). Bušenja su na svakom uzorku izvođena na način da se kombinacija parametara obrade nasumično mijenjala. Tijekom bušenja snimani su signali sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora. Po završetku ove faze uslijedila je faza trošenja svrdla do idućeg stupnja istrošenosti (S2). Na početku i kraju svake od navedenih faza, direktnim mjerenjem određivani su oblici trošenja reznog dijela svrdla. Ove dvije faze ponavljale su se sve do stupnja istrošenosti S4. Ovaj je postupak prikazan dijagramom na slici 6.1.

Tablica 6.1. Režimi obrade prema odabranim parametrima obrade iz plana pokusa

| promjer svrdla | brzina rezanja | posmak  | učestalost vrtnje GV | posmična brzina | dubina provrta | broj ponavljanja za svaki stupanj istrošenosti i vrstu kamena |
|----------------|----------------|---------|----------------------|-----------------|----------------|---|
| $d$            | $v_c$          | $f$     | $n$                  | $v_f$           | $a_p$          |   |
| mm             | m/min          | mm/okr. | min <sup>-1</sup>    | mm/min          | mm             |   |
| 5              | 10             | 0,03    | 636,62               | 19,1            | 15             | 7   |
|                | 15             |         | 954,93               | 28,6            |                |   |
|                | 20             |         | 1273,24              | 38,2            |                |   |
|                | 10             | 0,06    | 636,62               | 38,2            |                |   |
|                | 15             |         | 954,93               | 57,3            |                |   |
|                | 20             |         | 1273,24              | 76,4            |                |   |
|                | 10             | 0,09    | 636,62               | 57,3            |                |   |
|                | 15             |         | 954,93               | 85,9            |                |   |
|                | 20             |         | 1273,24              | 114,6           |                |   |



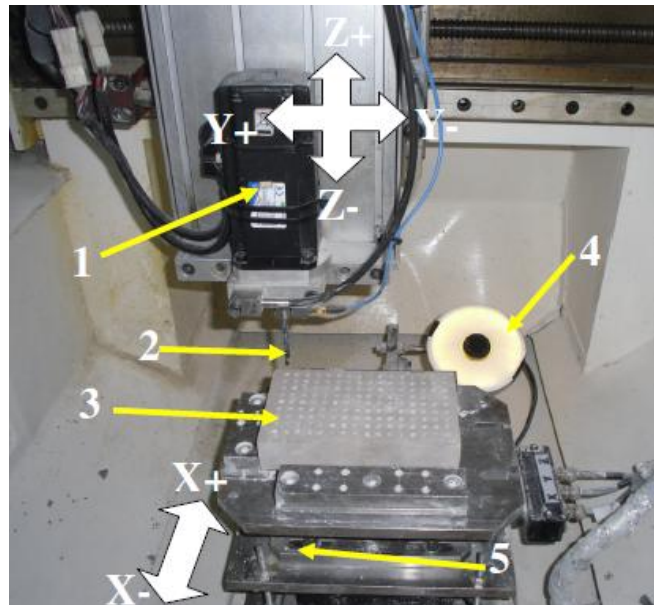
Slika 6.1. Redoslijed provođenja eksperimenta

Ispitivanja su se provodila na odgovarajućem ispitnom postavu u Laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Korišteni alat je svrdlo promjera 5 mm s vršnim kutem od  $118^\circ$  i reznom pločicom od tvrdog metala.



## 6.1. Ispitni postav i mjerni sustav

Ispitivanja su se provodila na ispitnom postavu, koji se može vidjeti na slici 6.2. Postav se sastoji od troosne numerički upravljane glodalice, senzora za mjerenje sila i senzora za mjerenje struja glavnog i posmičnog motora zajedno s pripadajućom opremom za obradu signala.



Slika 6.2. Troosna numerički upravljana glodalica: (1) motor za glavno gibanje, (2) svrdlo, (3) obradak, (4) kamera, (5) senzor sila

Korišteni senzor sila (slika 6.3) je piezoelektrični trokomponentni senzor oznake 9257B tvrtke KISTLER Holding AG. Senzor ima mogućnost mjerenja sila u smjeru osi x, y i z u vrijednosti od -5 do 10 kN. Senzor sila nalazi se ispod stezne naprave i pričvršćen je na pomičnu "X" os stroja. Na senzor sila pričvršćen je uređaj za stezanje obradaka te je tako omogućeno mjerenje sila u bilo kojoj poziciji i trenutku obrade.



Slika 6.3. Senzor sila

Piezoelektrični senzori tijekom mjerenja stvaraju električni naboj u proporciji s nametnutim opterećenjem pa je potrebno koristiti nabojno pojačalo koje taj naboj pretvara u proporcionalni naponski signal. Pojačalo koje se koristilo sa senzorom sila također je proizvod tvrtke KISTLER Holding AG, a oznaka mu je 5017B i prikazan je na slici 6.3.



Slika 6.4. Nabojno pojačalo

Na glavnom upravljačkom računalu (slika 6.4), koje je povezano s numerički upravljanom glodalicom i nabojnim pojačalom, podešavali su se parametri obrade te se ostvarivao prikaz rezultata mjerenja sila i struja glavnog motora.

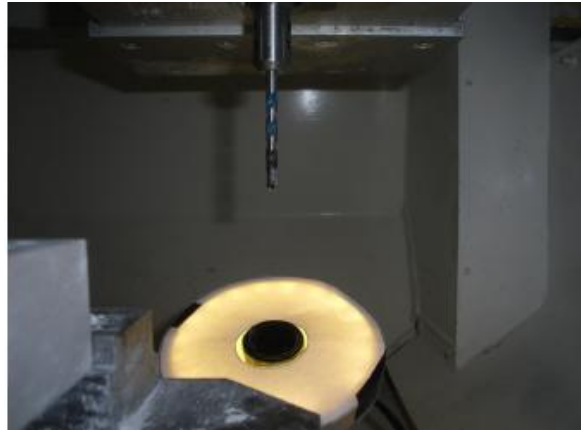


Slika 6.5. Prikaz podataka mjerenja i određivanje parametara obrade

### 6.1.1. Snimanje oštrice svrdla

Oštrica svrdla je snimana nakon određenog broja izbušenih provrta kako bi se na temelju mjerenja geometrijskih značajki prikazalo napredovanje istrošenosti svrdla. Nakon izbušenog određenog broja provrta, svrdlo je zauzimalo zadane pozicije za snimanje oštrice. Svaka

oštrica svrdla je snimljeno pod kutem od  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ , kako bi se dobio što bolji uvid u trošenje. Kamera i alat u poziciji za snimanje mogu se vidjeti na slici 6.1.



Slika 6.6. Pozicija alata za snimanje oštrice

## 6.2. Ciklusi trošenja svrdla i mjerenja istrošenosti

Prvi ciklus mjerenja S1 proveden je na samom početku eksperimentalnog dijela na potpuno oštrom svrdlu. Mjerenje se provodilo na način da su se bušili provrti, po jedan u svakoj od tri vrste kamena, nasumičnim odabirom parametara iz tablice 6.1. Ciklus mjerenja se, dakle sastojao od ukupno 27 nasumično izbušenih provrta, po devet za navedene parove parametara u tri različita kamena.



Slika 6.7. Ciklus mjerenja istrošenosti

Nakon ciklusa mjerenja S1 i ukupno 189 izbušenih provrta, uslijedilo je trošenje T1. Trošenje se izvodilo na kamenu K1, na način da se izbušilo 1000 provrta s brzinom rezanja  $15\text{m/min}$  i

posmakom od 0,09mm/okr. Nakon prvog ciklusa trošenja (slika 6.8) i ukupno izbušenih 1189 provrta uslijedio je drugi ciklus mjerenja korištenjem svrdla stupnja istrošenosti S2.



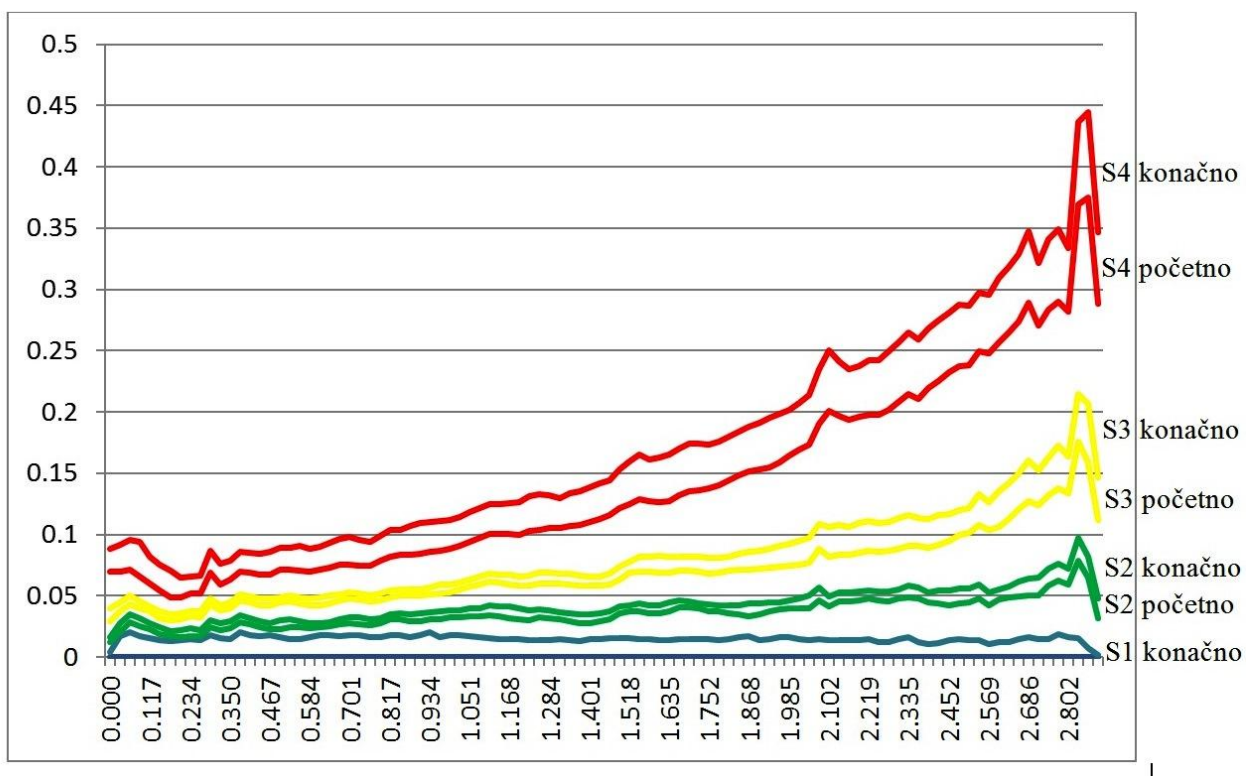
Slika 6.8. Ciklus trošenja

## 7. ANALIZA REZULTATA

### 7.1. Rezultati direktnih mjerenja

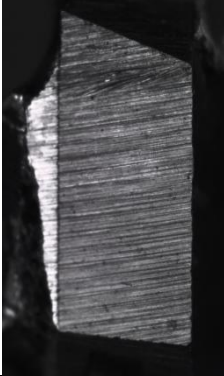
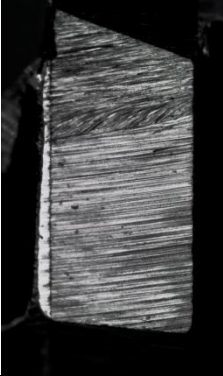
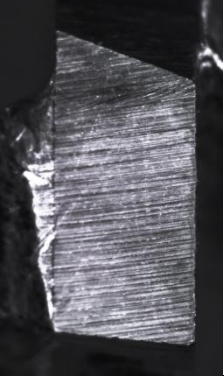
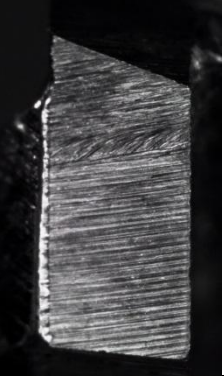
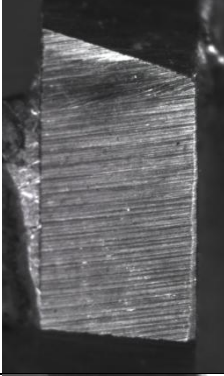
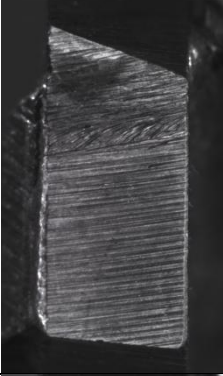
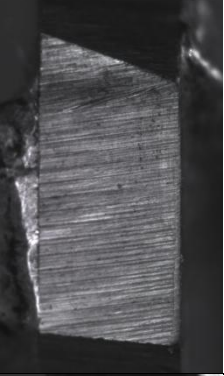
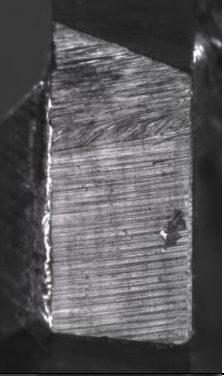
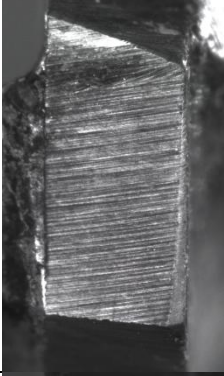
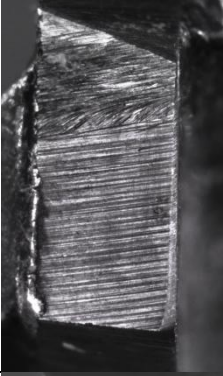
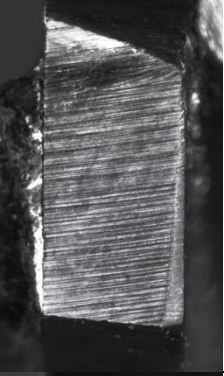
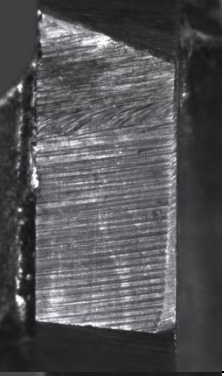
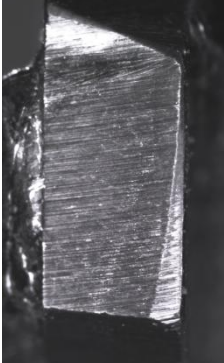
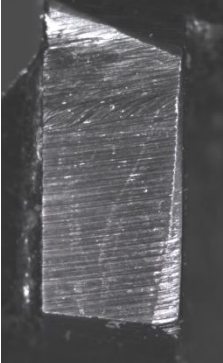

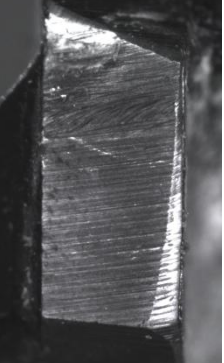
U tablici su prikazani početni i konačni oblici trošenja oštrica „1“ i „2“ za svaki stupanj istrošenosti. Promatrajući oštricu, vidljiv je porast istrošenosti od središta svrdla prema krajevima glavnih oštrica, gdje je zbog najveće vrijednosti brzine rezanja došlo do najintenzivnijeg trošenja alata.

Analizom vizualnih snimaka oštrice moguće je prema mjerenim geometrijskim parametrima prikazati istrošenost oštrice s obzirom na udaljenost od središta svrdla. Na slici 7.1 prikazane su srednje vrijednosti istrošenosti oštrica „1“ i „2“ korištenog svrdla, na početku i na kraju svakog pojedinog stupnja istrošenosti. Dijagram pokazuje navedeni porast istrošenosti kako se udaljenost od samog središta svrdla povećava. Tablica 7.1 prikazuje oblike trošenja obje oštrice za svaki stupanj istrošenosti.



Slika 7.1. srednje vrijednosti istrošenosti oštrica „1“ i „2“

Tablica 7.1. Početni i konačni oblici trošenja prema stupnju istrošenosti

| Stupanj istrošenosti | Početno stanje  |   | Konačno stanje   |   |
|----------------------|---|---|--|---|
|                      | Oštrica 1   | Oštrica 2   | Oštrica 1  | Oštrica 2   |
| S <sub>1</sub>       |    |    |    |    |
| S <sub>2</sub>       |   |   |   |   |
| S <sub>3</sub>       |  |  |  |  |
| S <sub>4</sub>       |  |  |  |  |

Rezultati direktnih mjerenja ukazali su na trošenje stražnje površine kao jedinog opaženog oblika trošenja prisutnog kod svih stupnjeva istrošenosti. U tablici 7.2 prikazane su vrijednosti srednje i maksimalne širine trošenja stražnje površine  $VB_{SR}$  i  $VB_{MAX}$  za svaki pojedini stupanj istrošenosti svrdla.

Tablica 7.2. Područja parametara trošenja s obzirom na stupanj istrošenosti

| Stupanj istrošenosti | Srednja širina trošenja stražnje površine $VB_{SR}$ |          | Maksimalna širina trošenja stražnje površine $VB_{MAX}$ |       |
|----------------------|---|----------|---|-------|
|                      | min   | max      | min   | max   |
| S1                   | 0   | 0.014955 | 0   | 0.027 |
| S2                   | 0.035295  | 0.04274  | 0.125   | 0.148 |
| S3                   | 0.069285  | 0.08292  | 0.242   | 0.293 |
| S4                   | 0.140675  | 0.17404  | 0.482   | 0.572 |

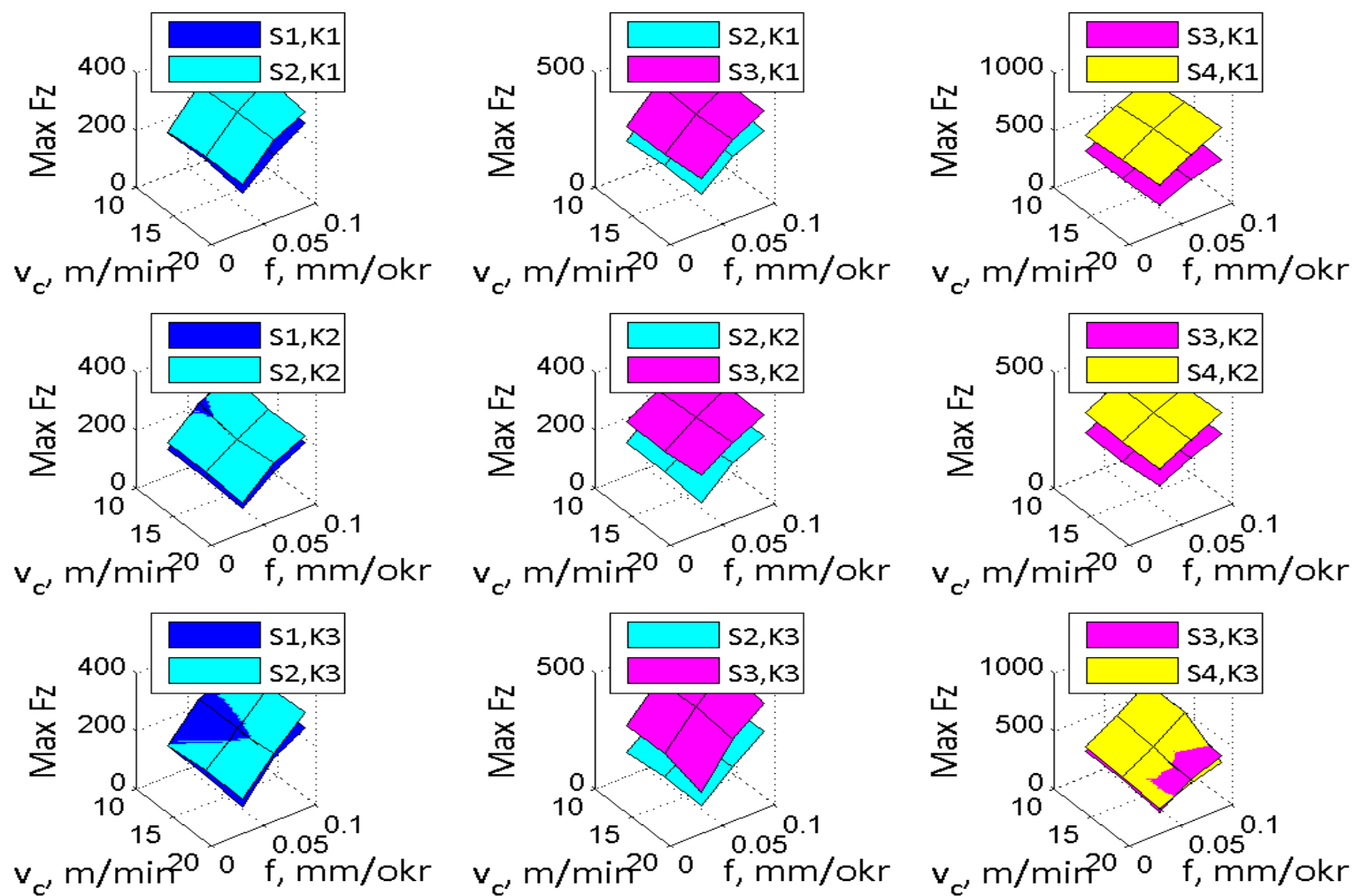
## 7.2. Rezultati indirektnih mjerenja

Različite kombinacije parametara utječu također i na sile koje djeluju na alat tijekom obrade kao i struje glavnog motora i posmičnog motora. Kako se u prethodnom dijelu moglo vidjeti trošenje oštrice i stražnje površine alata, za očekivati je da će se sile i struje motora mijenjati sa stupnjem istrošenosti alata.

### 7.2.1. Analiza rezultata mjerenja

Nakon eksperimentalnog dijela koji se sastojao od snimanja signala sila rezanja i struja glavnog i posmičnog motora pristupilo se analizi rezultata. Budući da su u eksperimentu bušene tri vrste kamena, bitno je pokušati povezati i usporediti vrijednosti signala s obzirom na stupanj istrošenosti svrdla i vrstu kamena, odnosno tvrdoću pojedinog kamena.

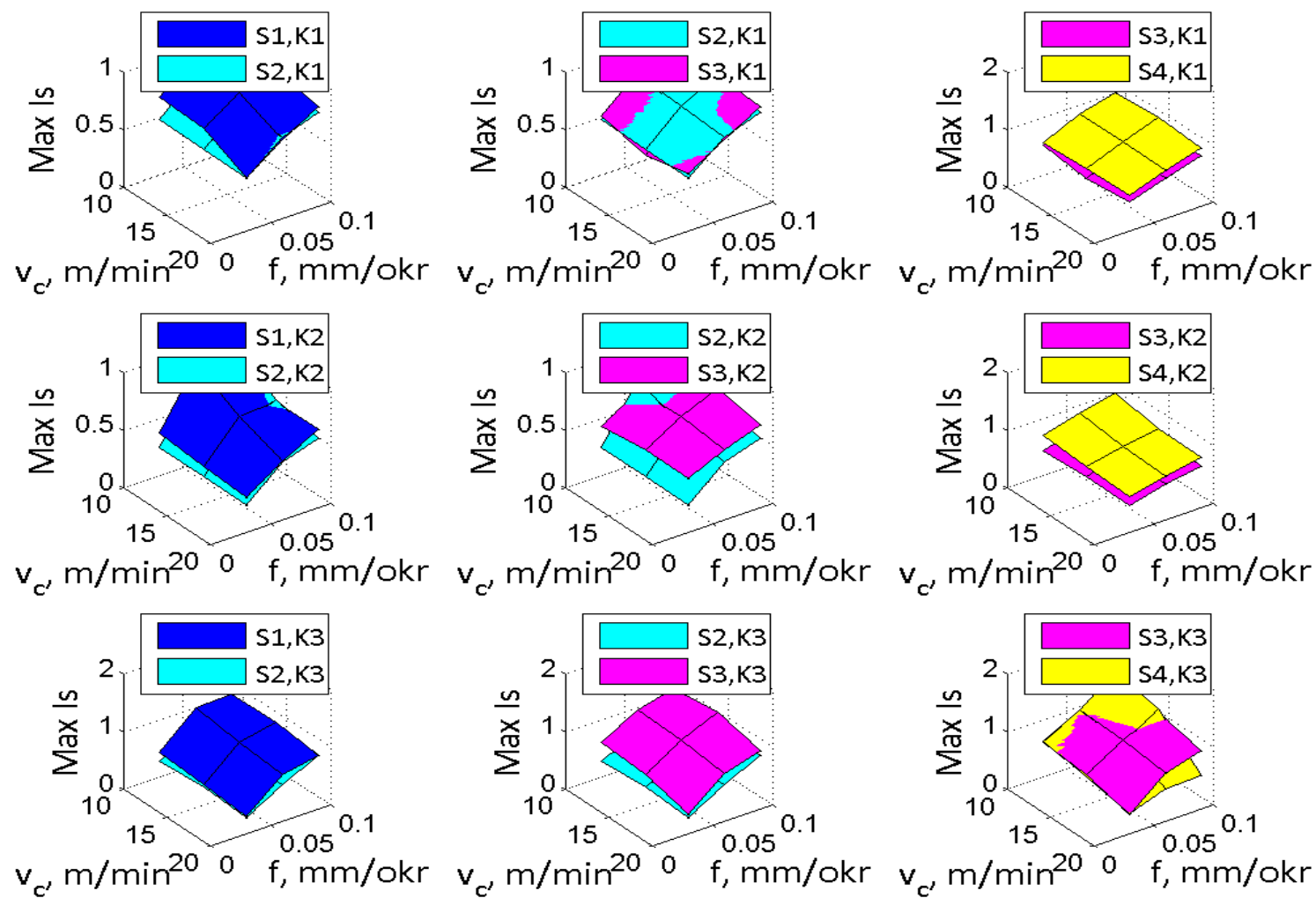
Analizom rezultata iz signala sila moguće je prikazati ovisnost razmatranih sila rezanja o parametrima obrade (brzini rezanja i posmaku) te prikazati razlike u izmjerenim silama rezanja u slučaju korištenja potpuno oštrog i potpuno tupog svrdla. Također je važno uzeti u obzir i različite vrste kamena, time i različite tvrdoće. Slike 7.2, 3 i 4 prikazuju dijagrame srednjih vrijednosti značajki izdvojenih iz signala sila i struja glavnog i posmičnog motora. Prikazan je odnos mjerenog signala, u ovom slučaju posmične sile  $F_z$ , struje glavnog motora  $I_s$  i struje posmičnog motora  $I_z$ , s obzirom na parametre procesa, brzinu rezanja  $v_c$  i posmak  $f$ .



Slika 7.2. Utjecaj parametara obrade i stupnja istrošenosti svrdla na posmičnu silu



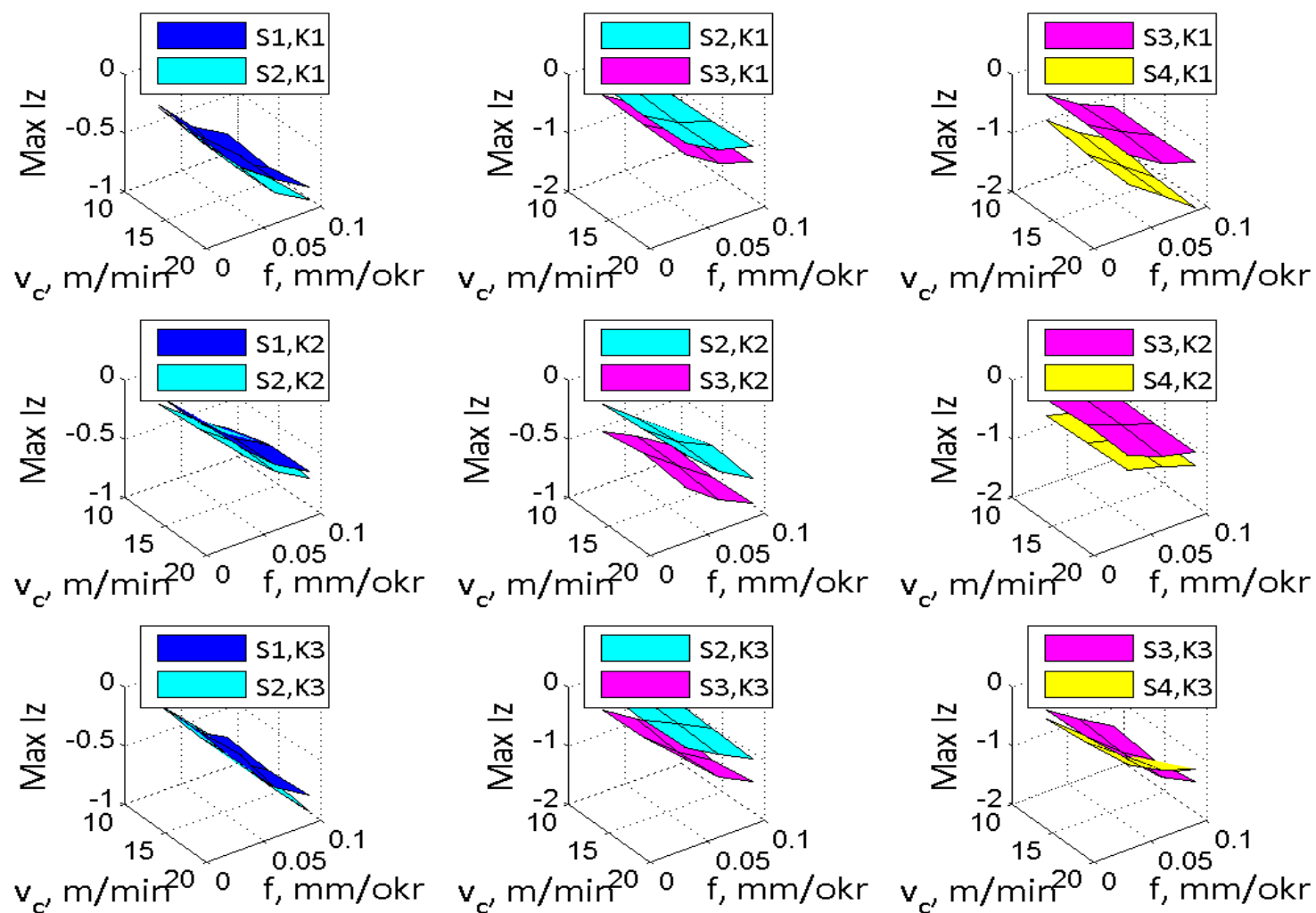
Pri bušenju kamena K1, uočljivo je da nema preklapanja vrijednosti posmičnih sila povećanjem stupnja istrošenosti. Kako raste stupanj istrošenosti, tako rastu i posmične sile na alatu. Kod kamena K2 se vidi malo preklapanje između vrijednosti posmičnih sila između stupnjeva istrošenosti S1 i S2. To znači da, nije moguće sa sigurnošću procijeniti utjecaj istrošenosti svrdla na ponašanje posmične sile. Stoga bi procjena stupnja istrošenosti zasnovana isključivo na ovoj značajki bila nepouzdana. Usporedbom stupnjeva istrošenosti S2, S3 i S4, uočljivo je da nema preklapanja vrijednosti posmičnih sila s porastom istrošenosti. Bušenjem kamena K3 došlo je do značajnijeg preklapanja vrijednosti sila pri stupnjevima S1 i S2 te S3 i S4. Može se zaključiti da snimanje sila tijekom bušenja kamena K3 pri različitim stupnjevima istrošenosti svrdla također neće dati pouzdane rezultate, a samim time i eventualnu procjenu tvrdoće kamena.



Slika 7.3. Izmjerene vrijednosti struja glavnog motora pri različitim stupnjevima istrošenosti alata

Slika 7.3 prikazuje utjecaj parametara i stupnjeva istrošenosti svrdla (S1-S4) na iznos struje glavnog motora kod obrada kamena K1, K2 i K3.

Kod kamena K1 se vrijednosti struje glavnog motora i istrošenosti svrdla preklapaju između stupnjeva S2 i S3, što znači da su se tijekom obrade razvile veće vrijednosti struja pri manjoj istrošenosti alata. Taj efekt se također može vidjeti i kod kamena K2, pri usporedbi stupnjeva istrošenosti S1 i S2 te S2 i S3 te kod kamena K3 usporedbom S3 i S4. Same značajke iz signala struja glavnog motora ne daju pouzdane rezultate za procjenu tvrdoće ispitivanog kamena.

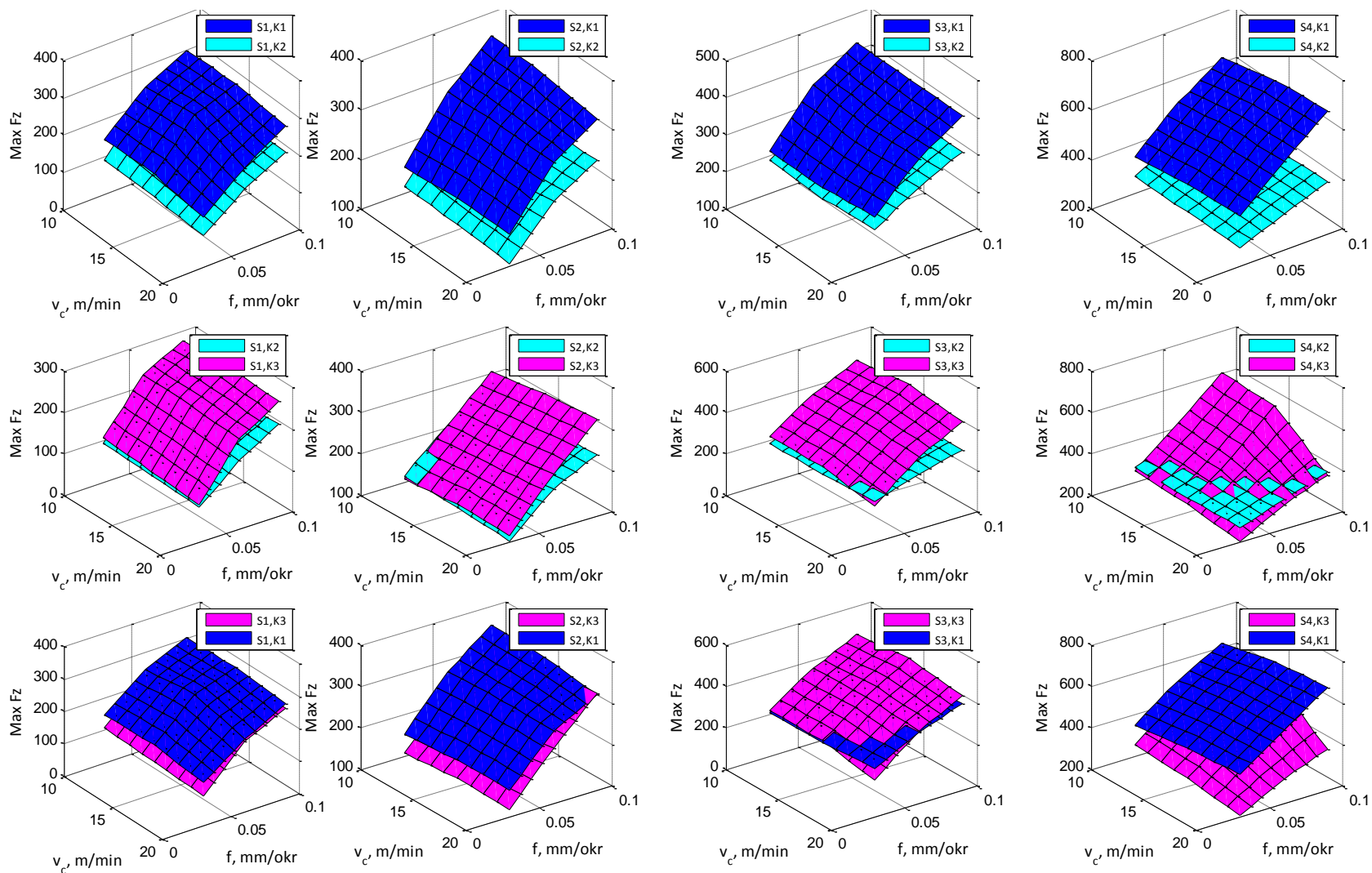


Slika 7.4. Izmjerene vrijednosti struja posmičnog motora pri različitim stupnjevima istrošenosti alata

Prema slici 7.4 preklapanja struja posmičnog motora su vidljiva kod kamena K2 između stupnjeva S1 i S2, kod kamena K3 između S3 i S4. Također se samo na osnovi signala struja posmičnih motora ne može pouzdano procijeniti vrijednost tvrdoće kamena.

Kombinacijom značajki sila te struja glavnog i posmičnog motora, može se dobiti robusniji model za procjenu tvrdoće kamena, međutim taj bi pristup zahtijevao primjenu odgovarajućih klasifikacijskih algoritama zasnovanih na računalnoj inteligenciji.

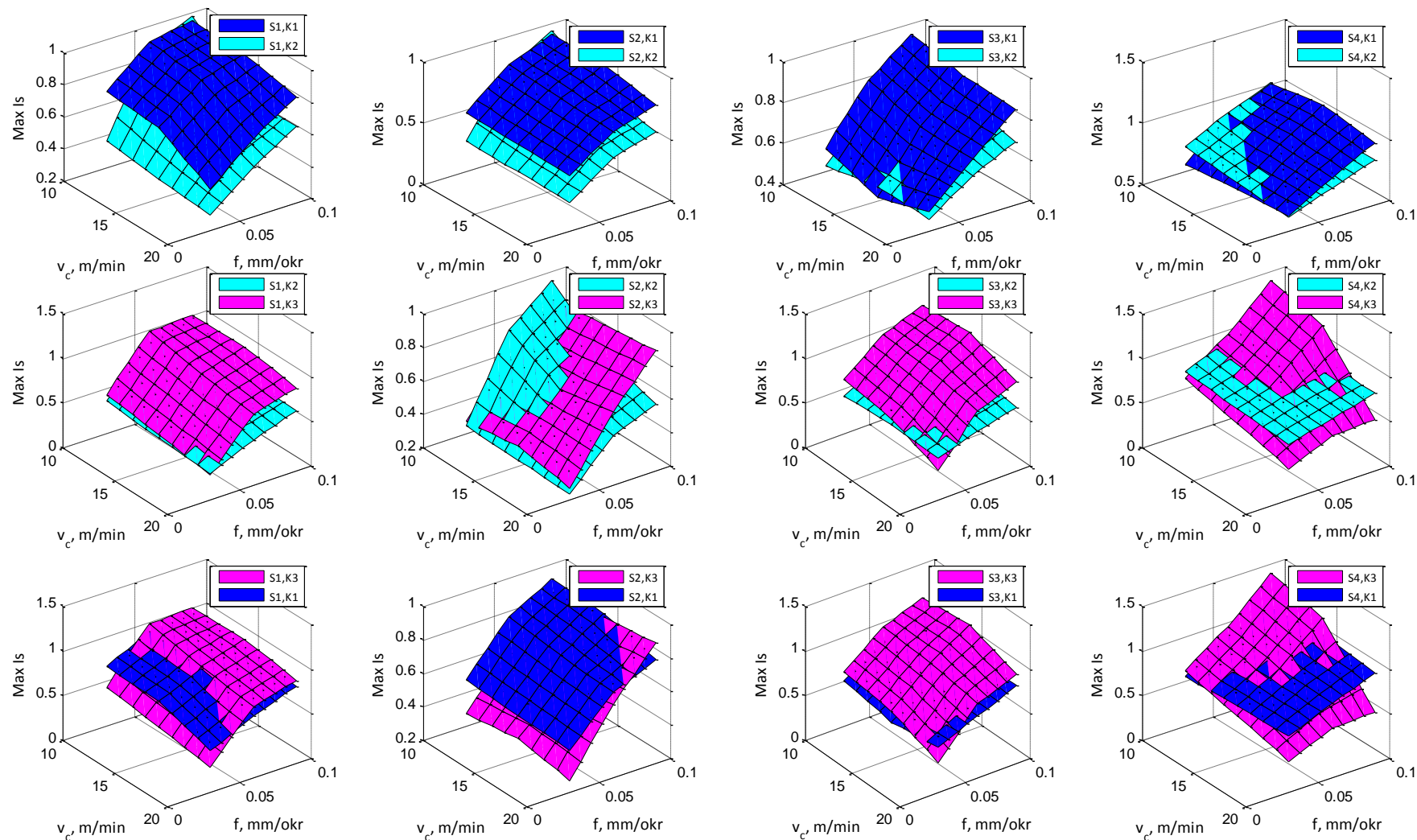
Na slikama 7.5, 6 i 7 je prikazana analiza vrijednosti za svaki stupanj istrošenosti svrdla, s obzirom na ispitivanu vrstu kamena i njihovu tvrdoću.



Slika 7.5. Analiza signala posmične sile, međuovisnost stupnjeva trošenja i vrste kamena

Uz mogućnost procjene tvrdoće pojedinog kamena na osnovu analize posmičnih sila i struja glavnog i posmičnog motora, svakako je važno procijeniti tvrdoću kamena u međusobnoj usporedbi dvaju kamena. Prikazane ovisnosti mjerenih vrijednosti između svakog para od kamena K1, K2 i K3.

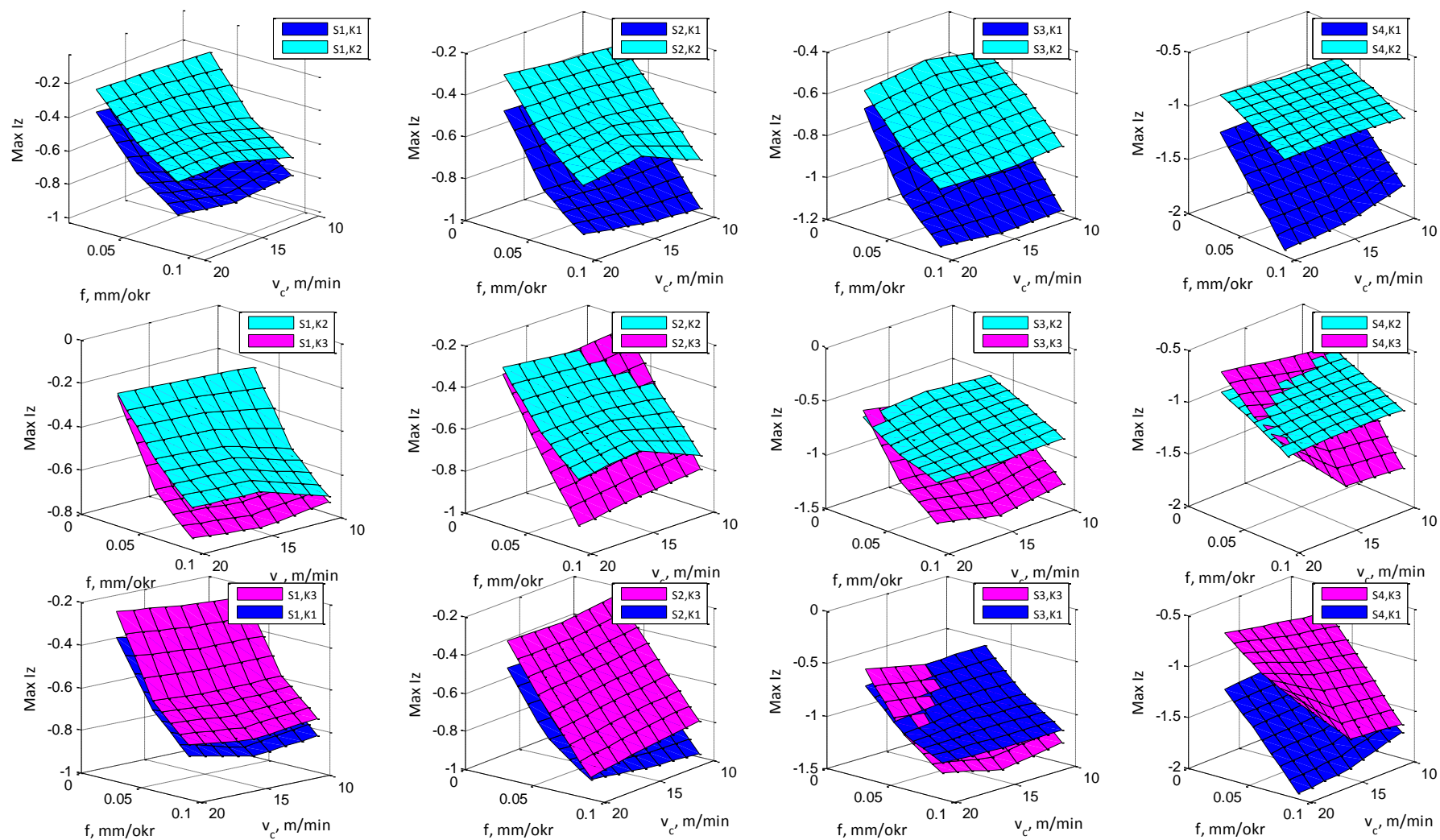
Slika 7.6 prikazuje analizu signala posmične sile između parova kamena. Preklapaju se vrijednosti posmičnih sila za kamen K3 i K3 u manjoj pri S4 te između K3 i K1 pri S3 u većoj mjeri. Sve ostale vrijednosti su prema grafu u redu pa slijedi da posmična sila  $F_z$  pokazuje potencijal za pouzdanu procjenu tvrdoće kamena.



Slika 7.7. Analiza signala struje glavnog motora, međuovisnost stupnjeva trošenja i vrste kamena



Iz slike 7.7 vidljivo je kako se dosta vrijednosti struje glavnog motora poklapa kod različitog para kamena. Vrijednosti se u manjoj ili većoj mjeri preklapaju kod sva tri para kamena pa se signali struje glavnog motora ne mogu sa sigurnošću uzeti kao pokazatelj procjene tvrdoće.



Slika 7.8. Analiza signala struje posmičnog motora, međuovisnost stupnjeva trošenja i vrste kamena

Analizom maksimalne vrijednosti jakosti struje posmičnog motora Z osi (slika 7.8), također je uočljivo da nema preklapanja vrijednosti između parova kamena, osim u slučaju S3 između kamena K3 i K1. Signali struje posmičnog motora se stoga mogu koristiti za pouzdanu procjenu tvrdoće kamena, poput vrijednosti  $F_z$ .

Analizom značajki signala važno je uzeti u obzir što više potencijalnih pokazatelja tj. signala čijom bi se obradom moglo što pouzdanije procijeniti svojstvo tvrdoće. U ovom slučaju se za potencijalni pouzdani pokazatelj procjene tvrdoće može uzeti posmična sila  $F_z$  i vrijednosti struja posmičnog motora  $I_z$ . Vidljiva je korelacija između posmičnih sila, struja kroz posmični motor Z osi i tvrdoće kamena. Naravno, kod ovakvih se procjena u obzir moraju uzeti i drugi utjecajni faktori te uvijek postoji mogućnost pogreške ili krive procjene.

### **7.3. Mjerenje tvrdoće**

Nakon ukupno provedenih četiri ciklusa mjerenja istrošenosti svrdla i tri ciklusa trošenja, izbušilo se sveukupno 3756 provrta. Oštrica svrdla se potrošila u tolikoj mjeri da nije više bilo moguće bušiti zbog pojave prevelikih posmičnih sila, koje su dosezale i 850 N.

Da bi se ustanovio utjecaj bušenja na tvrdoću kamena, svi uzorci od sva 4 ciklusa mjerenja istrošenosti su podvrgnuti mjerenju tvrdoće. Izmjerena je tvrdoća na sva 4 uzorka, sve tri vrste kamena. Tvrdoća je mjerena Knoop-ovom metodom i rezultati su prikazani u poglavlju 3..

#### **7.3.1. Vrijednosti izmjerene tvrdoće**

Prema danoj normi je u završnom dijelu eksperimenta izmjerena tvrdoća na svim uzorcima kamena nakon svakog ciklusa mjerenja. Napravljeno je 10 uzastopnih mjerenja s razmakom 1mm između otisaka na četiri uzorka svake pojedine vrste kamena. Vrijednosti Knoop-ove tvrdoće su prikazane u sljedećim tablicama.

Tablica 7.3. Vrijednosti tvrdoće u MPa na uzorcima kamena K1

| Razmak između otisaka, [mm] | K1U3     | K1U4     | K1U5     | K1U6     |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 1                           | 1689,097 | 1625,243 | 1799,377 | 2284,212 |
| 2                           | 2165,057 | 1612,908 | 1443,548 | 2243,423 |
| 3                           | 1729,233 | 1715,697 | 1273,32  | 1742,93  |
| 4                           | 1986,206 | 1756,79  | 1612,908 | 1663,112 |
| 5                           | 1742,93  | 1702,319 | 1689,097 | 1541,759 |
| 6                           | 2108,945 | 1785,011 | 1402,887 | 1729,233 |
| 7                           | 1799,377 | 1689,097 | 1576,731 | 2391,187 |
| 8                           | 1889,333 | 1519,086 | 1541,759 | 2108,945 |
| 9                           | 1858,612 | 1496,91  | 1742,93  | 1564,943 |
| 10                          | 1953,103 | 1729,233 | 1588,654 | 2020,158 |

Tablica 7.4. Vrijednosti tvrdoće u MPa na uzorcima kamena K2

| Razmak između otisaka, [mm] | K2U3     | K2U4     | K2U5     | K2U6     |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 1                           | 1519,086 | 1530,359 | 1475,216 | 1576,731 |
| 2                           | 1553,286 | 1612,908 | 1689,097 | 1519,086 |
| 3                           | 1637,721 | 1576,731 | 1637,721 | 1507,937 |
| 4                           | 1530,359 | 1650,343 | 1702,319 | 1475,216 |
| 5                           | 1625,243 | 1612,908 | 1625,243 | 1496,91  |
| 6                           | 1588,654 | 1612,908 | 1729,233 | 1317,453 |
| 7                           | 1663,112 | 1637,721 | 1689,097 | 1541,759 |
| 8                           | 1564,943 | 1612,908 | 1530,359 | 1402,887 |
| 9                           | 1553,286 | 1676,029 | 1600,712 | 1354,432 |
| 10                          | 1676,029 | 1689,097 | 1541,759 | 1475,216 |

Tablica 7.5. Vrijednosti tvrdoće u MPa na uzorcima kamena K3

| Razmak između otisaka, [mm] | K3U3     | K3U4     | K3U5     | K3U6     |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 1                           | 2603,636 | 2734,124 | 3090,393 | 2874,673 |
| 2                           | 2789,09  | 3190,346 | 2680,777 | 2146,106 |
| 3                           | 2529,778 | 2680,777 | 2995,066 | 3026,345 |
| 4                           | 2184,259 | 2391,187 | 2603,636 | 2127,404 |
| 5                           | 2263,68  | 2459,018 | 2263,68  | 3058,118 |
| 6                           | 2964,268 | 2874,673 | 2554,044 | 2284,212 |
| 7                           | 2707,253 | 3090,393 | 3026,345 | 2680,777 |
| 8                           | 2578,661 | 2391,187 | 3058,118 | 2734,124 |
| 9                           | 2680,777 | 2184,259 | 2146,106 | 2037,461 |
| 10                          | 2223,438 | 2761,397 | 2482,271 | 2761,397 |

S obzirom na izmjerene vrijednosti tvrdoće vidljivo je da nema prevelikih odstupanja tvrdoće u svakom od uzoraka pojedinog kamena. Razlog može biti mali broj mjerenja koji je izvršen (10) na relativno maloj površini (10 mm).

Tablica 7.6 prikazuje rezultate mjerenja tvrdoće za uzorke kamena K1, K2 i K3.  $HK_{MIN}$  predstavlja minimalnu vrijednost tvrdoće,  $HK_{MAX}$  maksimalnu,  $HK_{SR}$  srednju. U tablici je također navedena i vrijednost standardne devijacije označena s  $HK_{std}$ . Prema srednjim vrijednostima kamen K3 ima najveću vrijednost, dok K2 ima najmanju vrijednost tvrdoće.

Tablica 7.6. Rezultati mjerenja tvrdoća K1, K2 i K3

|    | $HK_{MIN}$ | $HK_{MAX}$ | $HK_{SR}$ | $HK_{std}$ |
|----|------------|------------|-----------|------------|
| K1 | 1402.887   | 2391.187   | 1762.883  | 234.1164   |
| K2 | 1317.453   | 1729.233   | 1575.3    | 91.77559   |
| K3 | 2037.461   | 3190.346   | 2622.831  | 319.6379   |

## 8. ZAKLJUČAK

Kamen je materijal heterogene strukture i specifičnih mehaničkih, fizičkih i kemijskih svojstava koja uvjetuju mogućnost njegove obrade i uporabe. Iz tog razloga nije moguće odrediti točne vrijednosti parametara kojim bi proces obrade bio najučinkovitiji. Stoga je glavni cilj u ovom radu bio istražiti utjecaj tvrdoće kamena na parametre procesa bušenja pri različitim parametrima obrade.

Procjena trošenja i životni vijek alata se smatra jednim od najvažnijih problema u automatizaciji procesa u CNC obradi. U današnje se vrijeme, nadzorom procesa obrade, nastoji konstantno pratiti dinamika trošenja oštrice i time unaprijediti učinkovitost procesa. Učinkovitost procesa, u ovom slučaju bušenja, se može poboljšati kontinuiranim praćenjem istrošenosti oštrice svrdla i u skladu s tim, njegovom pravovremenom izmjenom. Stoga je cilj istraživanja također bio odrediti značajke signala sila rezanja i struja pogonskih motora koje bi se potencijano mogle iskoristiti u izradi modela za procjenu istrošenosti svrdla i tvrdoće kamena.

U radu je dan opis najvažnijih svojstava kamena koja su u korelaciji s tvrdoćom te je eksperimentom prikazan utjecaj tvrdoće na signale mjerene prilikom bušenja određenog broja provrta. Plan pokusa proveden je na tri različite vrste kamena (K1, K2 i K3) od kojih su za svaku vrstu korištena po četiri uzorka. Tvrdoće kamenih uzoraka su u sklopu rada eksperimentalno utvrđene. Eksperiment se sastojao od bušenja tri vrste kamena, različitom kombinacijom parametara, konstantnim snimanjem istrošenosti oštrice i mjerenjem signala. U pokusu je korišteno spiralno svrdlo promjera 5mm kojim su bušeni uzorci pri različitim parametrima obrade i različitim stupnjevima istrošenosti. Ukupno je izbušeno 3756 provrta u četiri ciklusa mjerenja istrošenosti svrdla i tri ciklusa trošenja svrdla. Tijekom bušenja, snimani su signali sila rezanja i jakosti struja pogonskih motora. Uz navedeno, direktnim mjerenjem su snimani i oblici trošenja na reznim oštricama svrdla.

Analizom rezultata zaključilo se kako dobivene značajke iz signala sila i jakosti struja pogonskih motora mogu poslužiti za procjenu tvrdoće kamena. U nekim stupnjevima istrošenosti se posmična sila pokazala kao pouzdaniji pokazatelj procjene tvrdoće, nego jakosti struja, dok je u nekim drugim stupnjevima obrnuti slučaj. Međutim, nemoguće je analizom samo jednog od mjerenih signala (npr. posmične sile ili struje motora) pouzdano

procijeniti tvrdoću kamena. Naime, vidljiva su odstupanja mjerenih vrijednosti posmične sile, struja glavnog i posmičnog motora s obzirom na broj izbušenih provrta odnosno stupanj istrošenosti svrdla. Ipak je preporučljivo za kvalitetnu procjenu tvrdoće uzeti međusobnu kombinaciju mjerenih značajki signala čime bi se mogli dobiti zadovoljavajući rezultati.

Dobiveni rezultati predstavljaju bitnu informaciju za buduća istraživanja i mogućnost automatizacije procesa obrade nehomogenih materijala. U idućim istraživanjima se preporuča korištenje više vrsta senzora za nadzor procesa bušenja, a samim time bi se stvorili preduvjeti za izradu robusnijeg modela kojim bi se omogućila kvalitetnija, pouzdanija i točnije procjena svojstva tvrdoće.

## 9. LITERATURA

- [1] Quick, G., *Selective guide to the specification of dimension stone*, CSIRO Building, Construction and Engineering, Highet, Victoria, 2002.
- [2] Klaić, M., *Prijenosni stroj za graviranje kamena*, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [3] Pletikosić, L., *Primjena kamena u graditeljstvu*, diplomski rad, Građevinski fakultet, Zagreb, 2007.
- [4] Buzov, N., *Građevni materijali*, poglavlje 4. Materijali općenito, vrste i svojstva, Zagreb, 2015.
- [5] Siegesmund, S., Snethlage, R., *Stone in Architecture*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [6] Shalabi, F. I., Cording, E.J., Al-Hattamleh, O.H., *Estimation of rock engineering properties using hardness tests*, Engineering Geology 90 (2007) 138-147
- [7] Kavedžija, B., *Predavanja iz kolegija Tehnika izrade bušotina*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb
- [8] Solberg, S.M., *Improved drilling process through the determination of hardness and lithology boundaries*, NTNU – Trondheim, 2012.
- [9] Winkler, E.M., *Stone: Properties, Durability in Man-s Environment*, Springer-Verlag, New York, 1973.
- [10] Joshi, M.J., *Growth and characterization of Struvite and related crystals*, Saurashtra University, 2012.
- [11] Szwedzicki, T., *Indentation Hardness Testing of Rock*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 35, No. 6, pp. 825±829, 1998
- [12] Beste, U., Jacobson, S., *Micro scale hardness distribution of rock types related to rock drill wear*, Uppsala University, Wear 254 (2003) 2147-1154
- [13] Alar, Ž., *Analiza utjecajnih faktora na mjernu nesigurnost etalonskog tvrdomjera*, doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [14] Angus, H.T., *The significance of hardness*, Warwickshire, Wear, 54 (1979) 33-78
- [15] Ulusay, R., Hudson, J.A., *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring; 1974-2006*, Springer, 2006.
- [16] Cassapi, V.B., Phil, M., *Application of rock hardness and abrasive indexing to rock excavating equipment selection*, University of Nottingham, 1987.



- [17] Yasar, E., Erdogan, Y., *Estimation of rock physico-mechanical properties using hardness methods*, Faculty of Engineering, Adana, Turkey, Engineering Geology 71 (2004) 281-288
- [18] Cardu, M., Giraudi, A., *Metal-rock pair characterization in excavation engineering*, CNR-IGAG, Turin, Italy, 2012.
- [19] Dorner, D., *Indentation Methods in Experimental Rock Deformation*, Dissertation, Bochum, 2002.
- [20] Yasar, E., Erdogan, Y., *Estimation of rock physico-mechanical properties using hardness methods*, Faculty of Engineering, Adana, Turkey, Engineering Geology 71 (2004) 281-288
- [21] Cardu, M., Giraudi, A., *Metal-rock pair characterization in excavation engineering*, CNR-IGAG, Turin, Italy, 2012.
- [22] Dorner, D., *Indentation Methods in Experimental Rock Deformation*, Dissertation, Bochum, 2002.
- [23] Šajnović, Ž., *Utjecaj veličine otiska na Knoopovu tvrdoću SiC keramike*, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [24] Riester, L., Blau, P.J., Lara-Curzio, E., Breder, K., *Nanoindentation with a Knoop indenter*, Thin Solid Films 377-378 (2000) 635-639
- [25] Augustin, G., *Termičko oštećenje kosti tijekom bušenja dvostupnjevanim svrdlom i svrdlom s protočnim hlađenjem*, disertacija, Medicinski fakultet, Zagreb, 2011.
- [26] *Predavanja iz kolegija Obrada odvajanjem*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [27] Salopek, M., *Utjecaj hlađenja na sile rezanja i temperaturu kosti kod postupka bušenja*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [28] Staroveški, T., *Modeliranje trošenja medicinskog svrdla*, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [29] Niyazi, B., *Determination of drillability of some natural stones and their association with rock properties*, Faculty of Engineering and Architecture, Konya, Turkey, 2011.
- [30] Thuro, K., *Drillability prediction – geological influences in hard rock drill and blast tunnelling*, Vrije Universiteit Amsterdam, Geol Rundsch (1997) 86: 426-438
- [31] Mol, L., *Measuring rock hardness in the field*, British Society for Geomorphology, Geomorphological Techniques, Chap.1, Sec. 3.2 (2014)

- [32] Peček, M., *Utjecaj geometrije svrdla i parametara obrade na trošenje oštrice pri bušenju kamena*, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.