

# Alati za obradu kamena

---

**Dajak, Bruno**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:549034>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-05**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Bruno Dajak**

Zagreb, 2023. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Miho Klaić

Student:

Bruno Dajak

Zagreb, 2023. godina.

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

Zahvaljujem se prije svega Doc. dr. sc. Mihi Klaiću koji mi je izišao u susret sa mentorstvom iako su mu kapaciteti već od ranije bili popunjeni. Zahvaljujem mu se na strpljenju, razumijevanju te pomoći pri izradi rada.

Zahvalio bih se svim profesorima, mentorima, obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška prilikom studiranja te izradi završnog rada.

Bruno Dajak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bruno Dajak**

JMBAG: **0035223825**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Alati za obradu kamena**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tools for stone machining**

Opis zadatka:

Prerada arhitektonsko građevinskog kamena spada u djelatnost iskorištenja prirodnih resursa u zemljama diljem svijeta pa tako i u Hrvatskoj. Ova djelatnost bilježi kontinuirani rast i neprestano se razvijaju novi obradni strojevi i novi alati koji za cilj imaju veću produktivnost te smanjenje troškova proizvodnje. Shodno navedenom u ovom radu je potrebno:

1. Dati literaturni pregled stanja tržišta alata za obradu i oblikovanje kamena
2. Prikazati najnovije trendove u materijalima i obliku reznog dijela alata
3. Dati zaključke rada

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Miho Klaić

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. KAMEN.....	2
2.1. Osnovna podjela kamena .....	2
2.1.1. Magmatske stijene .....	2
2.1.2. Sedimentne stijene .....	3
2.1.3. Metamorfne stijene .....	3
2.2. Arhitektonsko-građevinski kamen .....	4
2.3. Povijest primjene kamena .....	5
2.4. Mehanička svojstva kamena utjecajna na obradivost .....	7
2.4.1. Tvrdoća .....	7
2.4.2. Abrazivnost .....	7
2.4.3. Tlačna čvrstoća .....	8
2.4.4. Poroznost.....	8
3. EKSPLOATACIJA KAMENA .....	9
3.1. Suvremeni strojevi za eksploataciju kamena .....	9
3.1.1. Lančana sjekačica .....	10
3.1.2. Žične pile .....	11
3.1.3. Sjekačica s dva rezna diska .....	12
4. STROJEVI ZA OBRADU KAMENA .....	13
4.1. Mosne pile.....	14
4.2. Žične pile.....	15
4.3. CNC strojevi .....	16
4.4. Obradni centri .....	16
4.5. Strojevi za završnu obradu .....	17
4.6. Strojevi za obradu vodenim mlazom .....	18
5. ALATI ZA OBRADU KAMENA .....	19
5.1. Materijali alata za obradu kamena .....	20
5.1.1. Tvrdi metal.....	20
5.1.2. Dijamant.....	21
5.2. Mehanizmi trošenja alata za obradu kamena .....	21
5.2.1. Abrazija .....	22
5.2.2. Adhezija .....	22
5.2.3. Difuzija .....	23
5.2.4. Oksidacija .....	23

---

5.2.5.	Plastična deformacija rezne oštrice.....	23
5.2.6.	Trošenje uslijed umora materijala.....	24
5.3.	Podjela alata za obradu kamena .....	24
5.3.1.	Rezni lanac.....	25
5.3.2.	Žica za piljenje.....	27
5.3.2.1.	Galvanizirana žica.....	28
5.3.2.2.	Sinterirana žica.....	28
5.3.2.3.	Vakumska žica .....	28
5.3.3.	Rezni disk.....	29
5.3.3.1.	Segmentna rezna oštrica .....	29
5.3.3.2.	Kontinuirana rezna oštrica za suhu obradu .....	30
5.3.3.3.	Kontinuirana rezna oštrica za mokru obradu .....	31
5.3.3.4.	Sile rezanja u obradi reznim diskom.....	31
5.3.4.	Svrdla .....	33
5.3.5.	Alati za glodanje .....	34
5.3.6.	Profilni alati .....	35
5.3.7.	Alati za poliranje.....	36
6.	TRENDOVI U OBRADI KAMENA .....	37
7.	ZAKLJUČAK.....	38
	LITERATURA.....	39

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Eksploatacija kamena u Egiptu [1].....	5
Slika 2.	Rimske ceste [1] .....	6
Slika 3.	Lančana sjekačica [10] .....	10
Slika 4.	Žična pila [11] .....	11
Slika 5.	Sjekačica sa dva rezna diska [12].....	12
Slika 6.	Mosna pila [14] .....	14
Slika 7.	Žična pila [15] .....	15
Slika 8.	Stroj za završnu obradu [18] .....	17
Slika 9.	Osnovni kutovi alata [20] .....	19
Slika 10.	Abrazijsko trošenje između 2 tijela [8] .....	22
Slika 11.	Adhezijsko trošenje [8] .....	22
Slika 12.	Oksidacijsko trošenje [8].....	23
Slika 13.	Trošenje uslijed umora materijala [8] .....	24
Slika 14.	Rezni alat lančane sjekačice [24] .....	25
Slika 15.	Žica za piljenje [25].....	27
Slika 16.	Segmentna rezna oštrica [27] .....	29
Slika 17.	Kontinuriana rezna oštrica za suhu obradu [28].....	30
Slika 18.	Kontinuriana rezna oštrica za mokru obradu [27].....	31
Slika 19.	Sile rezanja reznog diska [29] .....	32
Slika 20.	Svrdla za obradu kamena [30].....	33
Slika 21.	Sinterirano glodalo za obradu kamena [31] .....	34
Slika 22.	Alat za čeonu glodanje kamena [31] .....	34
Slika 23.	Alat za profiliranje [31] .....	35



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\gamma$	°	prednji kut
$\beta$	°	kut klina
$\alpha$	°	stražnji kut
$\delta$	°	kut između pasivne (natražne) i rezultante sile
$\varepsilon$	°	vršni kut
$\kappa$	°	kut namještanja glavne oštrice
$\lambda$	°	kut nagiba oštrice
$R$	N	rezultantna sila
$F_f$	N	sila koja djeluje duž smjera posmaka
$F_{fn}$	N	sila okomita na posmak
$F_c$	N	tangencijalna komponenta rezultantne sile
$F_t$	N	radijalna komponenta rezultantne sile
$d_p$	mm	dubina rezanja
$v_a$	m/min	posmična brzina
$v_t$	m/min	brzina rezanja
$b$	mm	debljina rezanja

## **SAŽETAK**

Kao i u svim industrijama, tako i u industriji obrada kamena je sveprisutan napredak i razvoj novih tehnologija i alata za obradu. Razvojem navedenoga postavljeni su i viši kriteriji na kvalitetu obrade i veće brzine rezanja. Industrija kamena sve je prisutnija te je u značajnom porastu kroz godine.

Završnim radom opisana je primjena kamena kako danas, tako i kroz povijest. Definirani su oblici i načini eksploatacije kamena kao i strojevi putem kojim se navedeno obavlja. U samoj obradi ključni su alati koji se sastavni dio strojeva. Alati su raznovrsni, a neki od njih i nisu toliko poznati, odnosno ne upotrebljavaju se u klasičnim obradama odvajanjem čestica.

Ključne riječi: kamen, industrija kamena, obrada odvajanjem čestica, eksploatacija kamena, alati za strojnu obradu kamena

## **SUMMARY**

As in all industries, progress and development of new technologies and tools for machine processing is ubiquitous in the stone processing industry. With the development of the above, higher demands were placed on the quality and cutting speed. The stone industry is increasingly present and has been growing significantly over the years.

This thesis describes the use of stone in the present as well as throughout history. The forms and methods of stone exploitation are defined, as well as the machines through which the exploitation is carried out. In the processing itself, the tools that are an integral part of the machines are key. The tools are diverse, and some of them are not so well-known, and they are not used in the classical, better-known material removal process.

Key words: stone, stone industry, material removal process, stone exploitation, tools for stone machining

## **1. UVOD**

Kamen je od početka civilizacije sveprisutan u ljudskom životu te je nemoguće zamisliti ljudski život bez njegove prisutnosti. U samim počecima čovjek je koristio kamen samo kao sirovinu u izgradnji, kao nakit, za pokapanje i slično, a kroz razvoj civilizacije je kamen postao među prvim materijalima koji je bio i obrađivan. Prvi alati bili su kameni, služili su za obradu drveta, lov i slične primarne procese i obrade.

Upotreba kamena neprestano raste, kako u svijetu tako i u Hrvatskoj, ponajviše u građevinskom sektoru. U počecima se kamen koristio kao nosivi element u izgradnji, a danas pretežito ima zaštitnu i estetsku ulogu. Ono što ga karakterizira je upravo njegova ljepota, trajnost i jednostavnost. Industrija kamena bila je prisutna već u najstarijim civilizacijama, a sam princip, odnosno ideja eksploatacije kamena do danas se nije puno mijenjala ukoliko se zanemari veliki korak u napretku tehnologije, strojeva i alata.

## 2. KAMEN

Kamen je svaka prirodna čvrsta masa ili agregat minerala. Sastoji se prvenstveno od zrnaca minerala i kristalnih krutina formiranih od atoma kemijski povezanih u uređenu strukturu. Neke stijene također sadrže mineraloide, koje su krute tvari slične mineralima, kao što je vulkansko staklo kojem nedostaje kristalna struktura. Vrste i brojnost minerala u stijeni određeni su načinom na koji su nastale. Većina stijena sadrži silikatne minerale, spojeve koji uključuju tetraedre silicijevog dioksida u svojoj kristalnoj rešetki i čine oko jednu trećinu svih poznatih vrsta minerala i oko 95% zemljine kore. Udio silicijevog dioksida u stijenama i mineralima glavni je faktor u određivanju njihovih imena i svojstava. Klasifikacija stijena vrši se prema karakteristikama kao što su mineralni i kemijski sastav, propusnost, tekstura sastavnih čestica i veličina čestica, a navedena fizička svojstva rezultat su procesa nastajanja. Tijekom vremena, jedna se vrsta kamena može transformirati u drugu. Stijene čine Zemljin vanjski čvrsti sloj, koru i veći dio njezine unutrašnjosti, osim tekuće vanjske jezgre i džepova magme u astenosferi. [1]

### 2.1. Osnovna podjela kamena

Postoji puno vrsta stijena, ovisno o načinu nastanka, upotrebi i slično, a svaka od tih vrsta ima mnoštvo podvrsta. Ponekad i nema striktno određene granice između samih podjela ukoliko se radi o srodnim vrstama stijena. Ipak, grupiraju se u tri osnovne skupine prema načinu nastanka:

- magmatske stijene,
- sedimentne stijene,
- metamorfne stijene.

#### 2.1.1. Magmačke stijene

Magmačke stijene nastaju hlađenjem i skrućivanjem magme na i ispod površine zemljine kore i plašta te na morskom dnu. Nastajanje magme uzrokovano je jednim ili više procesa, porastom temperature, padom tlaka ili promjene u sastavu. Povezane su s

vulkanskom aktivnošću, a njihova je distribucija uvjetovana kretanjem tektonskih ploča. Magmatske stijene mogu se razlikovati prema njihovoj teksturi, boji i sastavu. Razlika u navedenim parametrima ovisi o okruženju taloženja i kemijskom sastavu magme. Postoje intruzivne i efuzivne vrste navedenih stijena. [2]

### **2.1.2. Sedimentne stijene**

Sedimente stijene nastaju uslijed taloženja čestica sedimenta te djelovanjem vode, leda i vjetra. Kako taloženje sedimenta napreduje, litostatski tlak ga pritišće u uslojenu krutinu procesom litifikacije (nastanka stijene) pri čemu se istiskuje fluid kojim je donesen. Opisivanje svih kemijskih, fizikalnih i bioloških promjena, uključujući i cementaciju, kroz koje prolazi sediment nakon taloženja kroz litifikaciju, bez obzira na površinsko trošenje naziva se dijageneza. Sedimentne stijene su posložene u slojeve. Svaki novi sloj se polaže vodoravno na stariji u procesu zvanom superpozicija. Obično postoje praznine u slijedu koje se nazivaju diskordancije. One predstavljaju razdoblja u kojima nije dolazilo do taloženja ili u kojima su stariji slojevi bili izdignuti iznad razine mora i erodirani.

U sedimentnim stijenama sačuvani su fosili koji se ne mogu pronaći u magmatskim ili metamorfnim stijenama jer tlakovi i temperature na kojima se formiraju uništavaju fosilne ostatke. Sedimentne stijene dijele se na klastične, kemogene i biogene. Iako prekrivaju 75% kopnene površine Zemlje, njihov je ukupni udio procijenjen na svega 5%. [3]

### **2.1.3. Metamorfne stijene**

Metamorfne stijene su u osnovi stijene koje doživljavaju promjene uslijed djelovanja tlaka i temperature ispod zone dijageneze. U ranoj fazi nastanka metamorfnih stijena, izvorne teksture često su sačuvane što omogućuje određivanje izvornog oblika i vrste stijene, a on se naziva protolit. Kako se stupanj metamorfizma povećava, izvorne teksture zamjenjuju se metamorfnim teksturama kao i drugi tragovi, kao što je skupni kemijski sastav stijene, a koriste se za određivanje protolita. [2]

## 2.2. Arhitektonsko-građevinski kamen

Arhitektonski se kamen koristi kao blokovski, u pločama za unutarnja i vanjska horizontalna i vertikalna oblaganja tj. kao dekorativno-zaštitni i dekorativno-funkcijski element građevinskih objekata svih namjena. Zatim za arhitekturu, spomen-obilježja, arhitekturu groblja i kiparstvo te za različite proizvode zanatske djelatnosti. U suvremenom graditeljstvu je klasični način primjene kamena gotovo potpuno istisnut. Kod klasičnog načina građenja kamen je bio nosivi element konstrukcije objekta ili se primjenjivao u veoma debelim pločama za oblaganje. U suvremenom graditeljstvu kao nosiva konstrukcija koristi se uglavnom armirani beton, a kamen se koristi kao ukrasno zaštitna obloga te za konstrukcije. Temeljni oblik pri takvom suvremenom korištenju kamena kao arhitektonsko-građevinskog elementa su ploče. Korištenjem kamena kao tanke kamene obloge prvenstveno betonskih konstrukcija, on poprima dekorativnu funkciju odnosno dobiva dekorativnu i zaštitnu ulogu. Od arhitektonskog kamena se izrađuju ploče različito obrađenih površina, za vanjska zidna i podna, za unutarnja vertikalna i horizontalna oblaganja i za pokrivanje krovova. Od arhitektonskog kamena se izrađuju i kameni okviri za prozore i vrata, kameni okviri lukovi i vijenci, stupovi i prozorske klupčice i slično. Koristi se tako u kiparstvu, u grubom i finom klesarstvu, nadgrobnih ploča i ostalih elemenata grobne arhitekture, te za restauratorske radove na sakralnim objektima. Neovisno o namjeni arhitektonski kamen prvenstveno služi za oplemenjivanje čovjekovog okoliša. Za svaki slučaj namjene temeljni proizvod iz kojeg se izrađuju naznačeni proizvodi je kameni blok. Dostiže i do nekoliko desetaka puta veću tržišnu cijenu u odnosu na ostale vrste kamena. Odlikuje se bojom, teksturom, strukturom uzorka, obrađenom površinom te trajnošću, odnosno sposobnošću kamena da tijekom vremena očuva temeljne i specifične značajke čvrstoće, postojanosti i izgleda. [4]

Ekspluatiraju se različite magmatske, metamorfne i sedimente stijene. Eksploataciju za razliku od tehničkog kamena karakterizira nastanak velikih količina kamenog otpada (jalovine). Mogućnost dobivanja blokova kamena ovisi prije svega o cjelovitosti stijenske mase. Pukotinski sustavi pri eksploataciji arhitektonskog, za razliku od tehničkog kamena, imaju uglavnom negativan značaj, jer razbijaju stijensku masu na manje nepravilne komade što smanjuje mogućnost dobivanja većih blokova, odnosno povećava količinu gubitaka. Koeficijent iskorištenja blokovske mase pri eksploataciji arhitektonskog kamena je oko 40% jer je finalni proizvod kamenoloma zdravi blok iz kojeg se moraju izrezati maksimalne površine ploča koje se pri obradi i ugradnji neće lomiti. [5]

Komercijalna podjela arhitektonsko-građevinskog kamena dijeli se na:

- granite,
- mramore,
- kvarcite,
- ostale vrste kamena.

### 2.3. Povijest primjene kamena

Čovječanstvo je koristilo kamenje od samog početka svoga postojanja, a industrija kamena jedna je od najstarijih na svijetu. Kamen je u počecima korišten kao glavna komponenta u izgradnji zgrada i rane infrastrukture te samoj izradi alata. Teško je utvrditi kada su ljudi počeli eksploatirati i obrađivati kamen, ali stvaranje kamenog oruđa u regiji Južne Afrike datirano je i zabilježeno prije otprilike 60 000 godina. Postepeno se razvijalo i rudarstvo za vađenje kamena iz Zemlje i dobivanje minerala sadržanim u njima, uključujući i metale. Rudarstvo granita i mramora postojalo je još i u starom Egiptu, a drobljeni kamen intenzivno su koristile prve velike civilizacije za gradnju cesta, poput antičke Grčke i starog Rima. U Belgiji, Francuskoj i Engleskoj, otkriveni su prastari rovovi i jame iz kojih je čovjek prehistorijskog doba vadio kamen. Dakle rudarstvo kamena je prvo rudarstvo u povijesti.



Slika 1. Eksploatacija kamena u Egiptu [1]



Uporaba kamena kao prirodne sirovine jedna je od najdugotrajnijih čovjekovih gospodarskih djelatnosti i u Hrvatskoj. O tome govore antičke građevine koje se nalaze u našim suvremenim gradovima poput Poreča, Pule, Vinkovaca, Zadra, Splita, Hvara, Korčule, Dubrovnika, i mnogih drugih. Vađenje kamena za potrebe graditeljstva i kamenoklesarstva datira u Hrvatskoj od predantičkog doba da bi u vrijeme antike, kada su se u našim priobalnim i otočkim krajevima formirale grčke kolonije, a posebice u doba Rimljana, doseglo zavidan razvoj. Brojni zapisi govore o razvijenom kamenoklesarskom obrtu u doba Rimskog carstva, ali klesarstvo je u Hrvatskoj bilo poznato već i u Grčko-Ilirskom dobu. Navedeno mogu potvrditi brojni materijalni ostaci graditeljstva, obrambeni zidovi tadašnjih urbanih središta i dvorci. Najstarije poznate kamene građevine su ilirske kulture, zidane kamenom bez uporabe vapna kao veziva, te grobovi obloženi kamenim pločama. Antičko je razdoblje poznato po veoma intenzivnoj uporabi kamena za građenje monumentalnih građevina, akvadukata, mostova, skulptura i sarkofaga. Sva ta ostavština eksploatacije i primjene kamena pripada prvenstveno vremenu kada su u našim krajevima vladali Rimljani. Kao prvi kamenolomi na Braču poznati su od pamtivijeka kamenolomi Plate, Rasohe i Stražišća u neposrednoj blizini Škripa i Splita, a za gradnju Dioklecijanove palače vađen je tako kamen u okolici Trogira u kamenolomu Seget.



**Slika 2. Rimske ceste [1]**

Najznačajniji kamenolom iz doba Rimljana, na sjevernom dijelu hrvatske obale Jadranskog mora u Istri je, danas manje ali još uvijek aktivan, kamenolom Vinkuran, južno od

Pule. U kamenolomu se jasno uočava rimska tehnologija dobivanja blokova većih dimenzija, ručnom izradom. Tehnikom uskih kanala okomito na slojevitost, te dizanjem blokova po slojnim površinama, slabije ili jače naglašenim prirodnim diskontinuitetima. Autohtonim vapnencom iz kamenoloma Vinkuran građene su najvećim dijelom velebne antičke građevine u Puli. Njime je također izgrađen i amfiteatar u Puli. [6]

## **2.4. Mehanička svojstva kamena utjecajna na obradivost**

Kamen kao i svaki drugi materijal ima niz mehaničkih svojstava kojim je definiran. Neki od svojstava su gustoća, modul elastičnosti, poroznost, upijanje vode, otpornost na habanje. Termička linearna ekspanzija, postojanost i mnogi drugi. Budući da se primarno promatraju svojstva vezena uz obradu kamena, ističu se tvrdoća, abrazivnost, tlačna čvrstoća i poroznost. [7]

### **2.4.1. Tvrdoća**

Tvrdoća materijala predstavlja otpornost materijala na prodiranje u isti, a prodiranje najčešće vrši tvrdi materijal. Tvrdoća u slučaju kamena predstavlja otpornost na deformaciju. Postoje izravne i neizravne metode za ispitivanje svojstava kamena, a same metode mogu se vršiti na terenu ili pak pod kontroliranim uvjetima u laboratoriju. Najpoznatije metode mjerenja tvrdoće su po Vickersu, Brinellu, Rockwellu, Shoreu i Knoopu. Svaka metoda temeljena je na različitim principima i postupcima mjerenja. [8]

### **2.4.2. Abrazivnost**

Abrazivnost se definira kao sposobnost odupiranja trošenja kamena odnosno površinskog sloja uslijed kontakta stranog tijela. Stijene koje sadrže zrna tvrdih minerala povezanih sa slabije čvrstim vezivom imaju jako izražena abrazivna svojstva. Kvarcni pješčenjaci imaju izrazito visoku abrazivnost. Na abrazivnost najveći utjecaj imaju šupljine i pore. [8]

### **2.4.3. Tlačna čvrstoća**

Tlačna čvrstoća jednaka je aksijalnom opterećenju ispitnog uzorka po jedinici površine prilikom koje nastaje deformacija ili lom uzorka. Vrijednosti tlačne čvrstoće kamena iznose u granicama od 80 do 250 MPa, a ovise o vrsti i strukturi kamena. Veliki utjecaj na rezultate ispitivanja ima pozicija mikro pukotina unutar uzorka, također bitno utječe i mehanička stabilnost minerala, a ujedno i vrsta veziva između pojedinih minerala kamena. [8]

### **2.4.4. Poroznost**

Poroznost je svojstvo kamena koje definira udio pora unutar ispitnog uzorka. Kvantitativno se izražava kao odnos izražen u postotku volumena svih šupljina sadržanih u uzorku prema ukupnom volumenu ispitnog uzorka. Poroznost opisana na ovaj način poznata je kao apsolutna ili ukupna poroznost. Bitno je napomenuti postojanje otvorene ili relativne poroznosti koja uzima u obzir šupljine unutar kamena ispunjenog vodom. [8]

### 3. EKSPLOATACIJA KAMENA

Eksploatacija arhitektonsko-građevnog kamena je vrlo osjetljiva i zahtjevna djelatnost. Uspješnost i isplativost eksploatacije arhitektonsko-građevnog kamena ovise o više čimbenika, a neki od njih su geološki uvjeti, koeficijent iskorištenja, primijenjena tehnologija, dekorativnost kamena, položaj ležišta i mnogi drugi. Sama eksploatacija je vrlo skupa, ali kroz vrijeme se sve više isplati budući da se razvijaju nove tehnologije i tehnike koje znatno olakšavaju i ubrzavaju proces eksploatacije. Neke od metoda koje su se primjenjivale kroz povijest i koje se trenutno primjenjuju za dobivanje blokova su sljedeće: [9]

- izradom pašarina,
- primjenom klinova i poluga,
- primjenom eksploziva,
- primjenom helikoidalne žične pile,
- primjenom dijamantne žične pile,
- primjenom samohodne sjekačice,
- primjenom strojeva sa reznim diskovima.

Neke od navedenih metoda se ne koriste zbog svoje niske produktivnosti i zastarjelosti. Rijetko se koristi samo jedna metoda već se koriste kombinacije nekih od navedenih. Ovisno o načinu eksploatacije, možemo ju podijeliti na:

- površinski način eksploatacije,
- podzemni način eksploatacije.

#### 3.1. Suvremeni strojevi za eksploataciju kamena

Ovisno o vrsti kamena, njegovoj tvrdoći kamena primjenjuju se različiti strojevi za eksploataciju. U suvremenim metodama koriste se:

- lančane sjekačice,
- žične pile,
- samohodne lančane sjekačice,
- sjekačice sa reznim diskovima.

### 3.1.1. Lančana sjekačica

Lančane sjekačice koriste se za horizontalne i vertikalne rezove. Dostupne su u izvedbi kao priključni strojevi za vozila, ali i kao samostalni strojevi. Postoji također i samohodna lančana sjekačica koja je danas najisplativija. Prednost lančane sjekačice je što su pripremne radnje znatno kraće i jednostavnije u odnosi na obradu žicom. Rezni alat lančane sjekačice je mač s lancem na koji su pričvršćene rezne pločice. U današnjim izvedbama sjekačica, rezne pločice se pričvršćuju vijcima tako da se u slučaju istrošenosti ne mijenjaju nosači već samo rezne pločice. Stroj se giba po tračnicama te se reguliraju parametri pri obradi poput brzine rezanja lancem i posmaka sjekačice. Lanac se također redovno podmazuje. Primarna pogonska energija lančanih sjekačica je uvijek električna, dok sekundarna energija za pogon motora može biti električna ili hidraulična. Postoje i etažne lančane sjekačice koje se uglavnom koriste za izradu stražnjeg velikog reza ("leđa") za dobivanje primarnih blokova kao i velikih horizontalnih rezova. [10]



Slika 3. Lančana sjekačica [10]

### 3.1.2. Žične pile

Žična pila sastoji se od pogonskog dijela sa zamašnjakom koji se nalazi u kućištu na poluosovini unutar konstrukcije smještene na četiri metalna kotača, sustava za hlađenje i upravljačkog dijela odvojenog od pogonskog stroja radi zaštite radnika. Rezni element je žica. Pogonski stroj se giba po tračnicama preko zupčanika i zupčaste letve, prateći proces piljenja. Prve su izvedbe bile hidrauličke, ali zbog preosjetljivosti na nečistoće i prašinu koja se stvara prilikom korištenja uveden je elektromotorni pogon i automatska regulacija napinjanja žice ovisno o naprezanju. Na pogonskom kotaču nalazi se gumena obloga kojom se ostvaruje potrebni koeficijent trenja, a ujedno pruža zaštitu kotača i žice od trošenja. Povećanje obuhvatnog kuta žice i sprječavanje njenog spadanja s pogonskog kotača omogućavaju dvije orijentacijske koloture. Kako bi se mogla provesti daljnja obrada nakon postavljanja stroja potrebno je bušenje vertikalnih i horizontalnih bušotina za provlačenje dijamantne žice. Dijamantna žična pila ima mogućnost piljenja vertikalnih, kosih i horizontalnih rezova te se često koristi u kombinaciji s lančanom sjekačicom. [11]



Slika 4. Žična pila [11]

### 3.1.3. Sjekačica s dva rezna diska

Danas najčešće korišten stroj za eksploataciju je sjekačica s dvarezna diska. Jedna od velikih prednosti navedenog stroja je puno veća efikasnost u rezanju budući da se istovremeno vrši dva reza koja mogu biti različite dubine. Moguće je rezati tvrđe i mekše kamenje, a sam stroj posmak ostvaruje po tračnicama i prilagođava ovisno o tvrdoći kamena. Ovisno o željenoj dubini rezanja na stroj se postavljaju rezni diskovi različitih veličina. Nedostatak stroja je što je moguće izvoditi samo vertikalne rezove dok horizontalne nije moguće. Također je potrebna priprema za postavljanje tračnica po kojima će se stroj kretati što znači da teren mora biti prilagođen. Koriste se i razne inačice navedenog stroja za manje dubine rezanja i za druge vrste eksploatacije, u tom slučaju postoji i mogućnost istovremeno horizontalnog i vertikalnog rezanja. [12]



Slika 5. Sjekačica sa dva rezna diska [12]

## 4. STROJEVI ZA OBRADU KAMENA

Nakon eksploatacije kamenih blokova arhitektonsko-građevinskog kamena, blokovi idu na daljnju obradu. Sama daljnja obrada ovisi prvobitno o željenom konačnom proizvodu, a u daljnjoj obradi kamena koriste se i neke inačice strojeva za eksploataciju prilagođene potrebama daljnje obrade.

Strojevi za obradu kamena dijele se na:

- mosne pile,
- žične pile,
- CNC stojeve,
- obradne centre,
- strojevi za završnu obradu,
- strojeve za obradu vodenim mlazom.



#### 4.1. Mosne pile

Mosna pila je portalni alatni stroj s mostom kojim se kreće glava s alatom. Noviji strojevi imaju i po 2 motora ugrađena u glavu stroja koja su odgovorna za pomicanje po osima te generiraju elektroničko prednaprezanje koje kompenzira svaki zazor i povećava krutost sustava glave stroja i do devet puta u usporedbi sa standardnom verzijom s jednim motorom. Karakterizira ih visoka krutost zbog pojave velikog naprezanja uslijed obrade. Točnost rezanja određena je čvrstoćom mosta i grede. Naprezanje koje nastaje uslijed obrade prenosi se s alata na konstrukciju stroja, a konstrukcija stroja najčešće je od lijevanog željeza i prosječne je mase od dvije tone. Pokrete po osi osiguravaju kose zupčaste letve koje u odnosu na čelične zubne letve imaju veću nosivost, izdržljivije su i emitiraju manje buke. Jedan od glavnih dijelova stroja je i radni stol. Najčešće je riječ o hidrauličkom nagibnom stolu koji omogućuje jednostavan utovar ploče s podizača ploča ili viličara. [13]

Nagibni i rotirajući stol pretežito se može zaključati u bilo kojem položaju što omogućava neograničen broj kutova rezanja kako bi se zadovoljili zahtjevi obrade. Snaga motora ovisi o vrsti kamena koji se obrađuje te samom promjeru rezne ploče. U sklopu stroja nalazi se i laser koji služi za prikaz putanje rezne oštrice, a za hlađenje se koristi voda. Budući da i sam stol ima mogućnost pomicanja, nove mosne pile imaju mogućnost petoosne obrade. [14]



Slika 6. Mosna pila [14]

## 4.2. Žične pile

Žične pile upotrebljavaju se u portalnoj izvedbi. Nosivi stupovi čvrsto se usidreni u tlo i stabilizirani čeličnim steznim šipkama kako bi se zajamčila potpuna odsutnost savijanja koje bi moglo utjecati na učinak rezanja. Izvedbom stroja potrebno je osigurati da ne dođe do savijanja, a također je potrebno umanjiti učinak vibracija budući da u tom slučaju dolazi do dodatnog trošenja i loše kvalitete rezanja. Moguće je istovremeno imati nekoliko reznih žica u obradi, a moguće je i koristiti samo jednu, a sam rez ostvaruje se vertikalnim pomakom stroja. Zatezni kotači su kontrolirani hidrauličkim klipom kako bi se zajamčila jednolika i konstantna napetost svake žice. Svaka žica ima zaseban kotač za zatezanje, a sama promjena reznog alata je vrlo jednostavna. [15]



Slika 7. Žična pila [15]

### 4.3. CNC strojevi

CNC upravljanje odnosno računalno numeričko upravljanje je način upravljanja alatnim strojevima pomoću posebnih kodiranih naredbi programskog jezika (G koda), naredbi koje se učitavaju u upravljačkom računalu. U CNC sustavu mikroprocesor omogućuje izmjenu računalnog programa na samom stroju, a također je moguće provesti izmjene i tijekom strojne obrade. To svojstvo omogućuje veliku prilagodljivost u radu odnosno fleksibilnost i uštedu u vremenu obrade. Kod CNC strojeva postoji jedan glavni elektromotor za pogon glavnog vretena, a gibanje po osima ostvaruju najčešće servo motori s permanentnim magnetima. Pomak radnog stola vrši se pomoću kugličnog navojnog vretena dok se kao mjerni sustav stroja koristi linearni sustav mjerenja. CNC strojevi koriste se u velikom opsegu u proizvodnji budući da su vrlo precizni i brzi, a ovisno o potrebi dijele se na tokarilice, glodalice i bušilice. Svaki od navedenih ima prihvate za nekolicinu različitih alata koji su potrebni za obradu. [16]

### 4.4. Obradni centri

Obradni centri su strojevi koji imaju mogućnost integracije više različitih vrsta obrade u jedan stroj, što zapravo znači da jedan alatni stroj zamjenjuje više njih te da u jednom stezanju obavlja više različitih operacija. Navedeno rezultira većom dimenzijskom točnošću izratka te smanjenju vrijeme obrade. Smanjuje se vrijeme potrebno za stezanje, odnosno svodi samo na početno stezanje, te vrijeme potrebno za transport. Sve operacije su moguće na jednome mjestu bez nepotrebnih gubitaka u vidu pomoćnih vremena, a također jedan obradni centar na kojem je moguća izvedba kompletne obrade izratka, zauzima manje tlocrtne površine u proizvodnome objektu od izvedbe s više stroja. Podjela modernih obradnih centara može se izvršiti na temelju položaja glavnog vretena pa tako postoje horizontalne, vertikalne i horizontalno-vertikalne izvedbe. Osnovne izvedbe imaju tri pravocrtna gibanja po osima X, Y i Z, a Z os ujedno određuje i položaj glavnog vretena. Dodatna gibanja koja postoje kod obradnih centara su A, B i C, rotacije oko osi X (os A), rotacija oko Y (os B) i rotacija oko Z (os C). Te rotacijske osi su definirane preko glavnih osi. [17]

#### 4.5. Strojevi za završnu obradu

Radni stol po kojem klizi pokretna traka je odlučujući element u odnosu na kvalitetu brušenja ili poliranja. Osnovne karakteristike radnog stola su ravnost i krutost. Polirne glave sastoje se od jednoosnog posmičnog prigona te brusnog motora koji mora biti okomit na radni stol zbog postizanja dobre kvalitete obrađene površine. Većina strojeva ima više radnih glavi, odnosno obradnih alata te se obrada vrši istovremeno. Sustav dvostrukog pokretača vretena kontrolira pritisak obrade s ekstremnom osjetljivošću, poštujući mekše i lomljivije kamene materijale i jamči minimalno vrijeme odziva za podizanje glave s alatom u korist kvalitete ostvarene brušenja. Glava s alatom oscilira i kreće se oko mase vretena kako bi naprezanja bila minimalna te kako bi bilo što veća točnost. Oplata stroja koja je izložena krhotinama i utjecaju vode većinom je izrađena od nehrđajućeg čelika. Jedan od najopterećenijih elemenata i stoga najskloniji trošenju je vodilica između grede vretena i poprečnih mostova. Osim za poliranje, stroj je moguće koristiti i za druge oblike obrade površina kao što su brušenje, štokovanje i slično. Također se koriste i strojevi na kojim je moguća rotacija glave stroja s alatom oko horizontalne osi obratka kako bi se izvršila završna obrada rubova. Rotacija se može izvršiti za 180 stupnjeva. [18]



Slika 8. Stroj za završnu obradu [18]

#### **4.6. Strojevi za obradu vodenim mlazom**

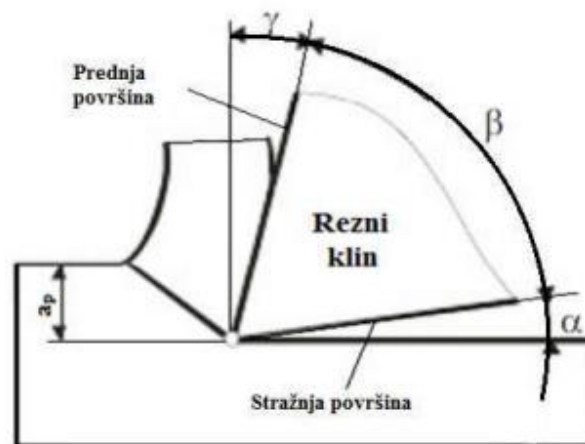
Stroj koji vrši obradu materijala vodenim mlazom složeni je obradni sustav kod kojeg je alat sam vodeni mlaz. Centralni dio stroja za rezanje vodenim mlazom je visokotlačna pumpa, koja potiskuje hidrauličnu tekućinu (ulje) u pojačivač tlaka kojim je moguće postići tlak i preko 4000 bara. Stroj može biti u CNC izvedbi, a noviji strojevi opremljeni su robotskim rukama. Prije početka obrade neke vrste materijala, potrebno je unijeti podatke o debljini materijala kao i željenu preciznost. Obrada je moguća u tri osi, a novije verzije strojeva, uzimajući u obzir i robotsku ruku može postići obradu i u više osi. Kvaliteta strojne površine najviše ovisi o brzini rezanja, koja ovisi o tipu i debljini materijala. Jedna od velikih prednosti je što u samoj obradi se ne razvija toplina te nema potrebe za izmjenom alata. Također ne nastaju nečistoće i postupak je ekološki prihvatljiva. Izvedba stola na kojem se vrši obrada je rešetkastog oblika kako bi se mlazu oduzela energija nakon izlaska iz zone reza te kako ne bi oštetili sam stroj. [19]

## 5. ALATI ZA OBRADU KAMENA

Alati za obradu kamena dijele se na ručne i alate za strojnu obradu. Ručni alati su rijetko u upotrebi, ali dijele mnogo toga zajedničkog s alatima za strojnu obradu koji će se proučavati u daljnjem radu.

Svi alati za obradu kamena osim vodenog mlaza imaju geometrijski definiranu ili nedefiniranu reznú oštricu. Geometrija rezne oštrice direktno utječe na trošenje alata, sile rezanja, zagrijavanje, oblik odvojene čestice i slično. Potpuno definiranu reznú geometriju oštrice čine tri osnovna kuta: [20]

- $\gamma$  – prednji kut (kut između prednje površine i ravnine okomite na ravninu rezanja, postavljenu kroz glavnu reznú oštricu),
- $\beta$  – kut klina (kut između prednje i stražnje površine),
- $\alpha$  – stražnji kut (kut između stražnje površine alata i obrađene površine).



Slika 9. Osnovni kutovi alata [20]

Suma osnovnih kutova oštrice alata mora iznositi 90 stupnjeva. Osim osnovnih kutova rezne oštrice, postoje i drugi:

- $\varepsilon$  – vršni kut,
- $\kappa$  – kut namještanja glavne oštrice,
- $\lambda$  – kut nagiba oštrice.

Osim geometrije alata, na parametre obrade povoljno utječe i primjena sredstva za hlađenje i podmazivanje kako bi se uklonile nečistoće koje nastaju prilikom obrade te kako bi se smanjilo trenje, a samim time i naprezanja te potrošnja energije prilikom obrade. Kao rashladno sredstvo koristi se pretežito voda s mogućim dodatkom poput polietilen glikola koji je topiv u vodi. [21]

## **5.1. Materijali alata za obradu kamena**

Materijali od kojih su izrađeni alati za obradu su dijamant i tvrdi metali, izuzev obrade vodenim mlazom. Postoje razne vrste alata ovisno o strukturi, elemenata koji se kemijski povezuju i slično.

### **5.1.1. Tvrdi metal**

Tvrdi metal je tehnički materijal koji se odlikuje velikom tvrdoćom, osobito na visokim temperaturama, te otpornošću na trošenje. To su kompozitni materijali koji se sastoje od karbida ili nitrida nekih prijelaznih metala (volframa, titanija, tantala, molibdena, kroma) kao tvrde faze, i od kobalta ili nikla kao veznoga metala. Tvrda se faza mnogo bolje otapa u rastaljenom veznom metalu nego obratno. Najveću topljivost pokazuje volframov karbid u kobaltu, pa je to jedan od razloga što se tvrdi metali najčešće sastoje upravo od tih sastojaka. Tvrdoća tvrdih metala iznosi približno 1500 HV (tvrdoća po Vickersu).

Tvrdi metali proizvode se sinteriranjem smjese sastojaka u obliku praha. Tijekom sinteriranja vezni metal otapa karbid tvoreći tekuću fazu zasićenu karbidom koja ispunjava prostor između ostalih karbidnih čestica. Osim toga, tvrdi metali proizvode se i prevlačenjem, odnosno nanošenjem tankoga sloja tvrdoga materijala na metalnu podlogu, najčešće kemijskim taloženjem pri raspadu pogodne smjese plinova. Koriste se u širokom rasponu, od praha za brušenje i poliranje do alata za tokarenje, bušenje, glodanje i slično.

Tvrdi metal se upotrebljava za izradu visokokvalitetnih reznih alata kod kojih se mogu primijeniti velike brzine rezanja i dobiti visoku kvalitetu površine koja se obrađuje. Zbog visokih temperatura koje se pri postupcima rezanja razvijaju, zahtjev u svojstvima se prije svega odnosi na veliku tvrdoću, otpornost na trošenje i stabilnost osobina na povišenim temperaturama (puzanje). [22]

### **5.1.2. Dijamant**

Zbog svoje se iznimne tvrdoće dijamant rabi za izradu različitih alata. Dijamanti se ugrađuju u razne oštrice i vrhove bušilica te tako povećavaju snagu rezanja. Dijamant se može pronaći u finim alatima za preciznu gravuru, a dijamantna se prašina upotrebljava za brušenje i poliranje. Dijamant je alotropska modifikacija ugljika, te je svaki ugljikov atom jakom kovalentnom vezom povezan sa četiri susjedna ugljikova atoma. Zbog istog razloga dijamant nije topljiv u vodi, kao ni u organskim otapalima. U prirodi dolazi u obliku dvije polimorfne modifikacije, a to su kubična i heksagonska, a kroz godine su ljudi razvili i sintetički dijamant koji je znatno jeftiniji u odnosu na prirodni. Za izradu alata u industriji pretežito se koristi sintetički dijamant. [23]

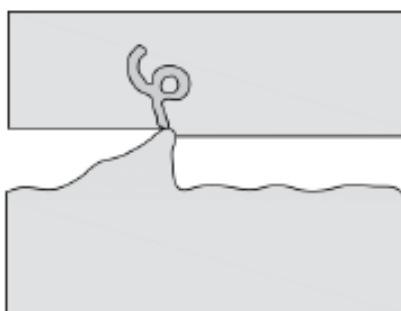
## **5.2. Mehanizmi trošenja alata za obradu kamena**

Tijekom procesa obrade odvajanjem, alati su izloženi raznim opterećenjima uslijed kojih do radnih mehanizmima trošenja. Najčešći i najutjecajniji mehanizmi trošenja su abrazija, adhezija, difuzija, oksidacija, plastična deformacija rezne oštrice i trošenje uslijed umora materijala.



### 5.2.1. Abrazija

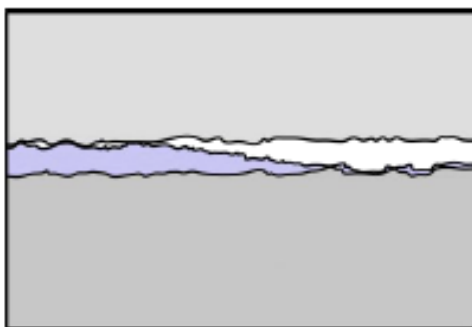
Abrazijsko trošenje predstavlja karakterističan proces trošenja, koji je uvijek prisutan kod procesa obrade odvajanjem čestica. Nastaje pri kontaktu alata i obratka, najčešće utjecajem različitih uključina unutar materijala obratka. Intenzivno trošenje može izazvati neadekvatna hrapavost površina, što može biti posljedica drugih mehanizama trošenja. Produkt abrazijskog trošenja uzrokuje nastajanje malih ogrebotina u smjeru glavnog gibanja. Abrazijsko trošenje može se odvijati između 2 ili 3 tijela. [8]



Slika 10. Abrazijsko trošenje između 2 tijela [8]

### 5.2.2. Adhezija

Adhezijsko trošenje nastaje odmah nakon procesa rezanja, uglavnom pri nižim temperaturama, mehaničkim lijepljenjem, odnosno zavarivanjem malih komada netom prije odvojenih čestica, tvoreći tako naljepak na reznoj oštrici. Nakon kratkog perioda, dolazi do kidanja naljepka, a tako i mogućeg otkidanja dijela rezne oštrice alata. Adhezija raste s porastom tlaka između oštrice i odvojene čestice, a mogućnost nastanka naljepka raste s porastom hrapavosti površine. Kod postupka bušenja, stvaranje naljepka ne može se spriječiti neovisno o materijalu obratka. [8]



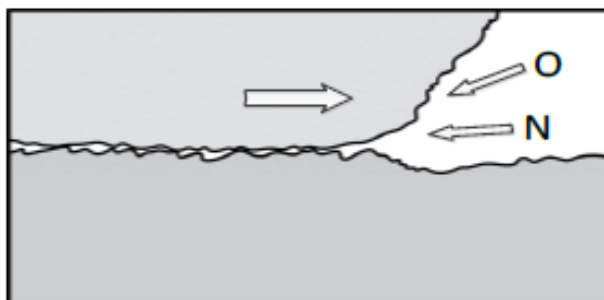
Slika 11. Adhezijsko trošenje [8]

### 5.2.3. Difuzija

Prilikom porasta brzine rezanja postižu se znatno više temperature tijekom obrade. Porast temperature, uzrokuje trošenja temeljena na mehaničkim i kemijskim djelovanjima. Difuzija predstavlja toplinski aktiviran efekt, a uzorkovana je kemijskim opterećenjima koja rastu s porastom temperature, te afinitetom materijala alata prema materijalu obratka. Difuzijsko trošenje je glavni čimbenik nastanka kraterskog trošenja. [8]

### 5.2.4. Oksidacija

Oksidacijsko trošenje uzrokovano je kemijskim promjenama unutar materijala alata, pri povišenim temperaturama uz prisutnost zraka. Najčešća mjesta na kojima nastaje oksidacija su početak i kraj dijela oštrice koja je u zahvatu s obratkom. Problem pojave oksidacije, reducira se pravilnim odabirom alata, upotrebom raznovrsnih prevlaka ili upotrebom alata od tvrdog metala građenih s određenim vezivom. [8]



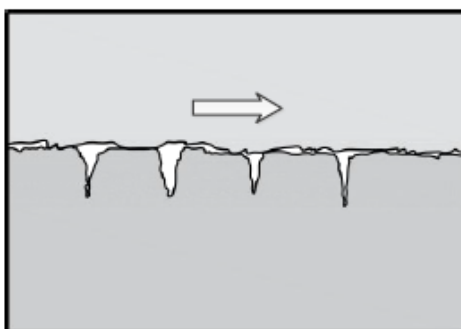
Slika 12. Oksidacijsko trošenje [8]

### 5.2.5. Plastična deformacija rezne oštrice

Prilikom postupka obrade i uslijed povišene temperature, uz istovremeno djelovanje tlačnih naprezanja na reznu oštricu alata, može doći do pojave plastičnih deformacija i značajne promjene geometrijskih kutova alata. Plastična deformacija javlja se pri visokim temperaturama, a do nje dolazi zbog adhezijskog trošenja između odvojene čestice i rezne oštrice alata. Najčešće se javlja kod alata izrađenog od tvrdog metala, ali može se pojaviti i kod alata izrađenog od polikristalnog dijamanta i keramike. Na navedeni proces trošenja može se utjecati pravilnim odabirom geometrije i vrstom materijala reznog alata. [8]

### 5.2.6. Trošenje uslijed umora materijala

Na samom ulasku alata u zahvat s obratkom, opterećenje na reznu oštricu naglo raste, a time raste temperatura u zoni kontakta sve do izlaska alata iz zahvata. Proces se periodički ponavlja, u visokoj frekvenciji što dovodi do navedenog oblika trošenja. Ako se pojavi više manjih pukotina na prednjoj površini alata, dolazi do razaranja iste što može uzrokovati krhanje, ili u najgorem slučaju lom oštrice. Posebna se pozornost prilaže odabiru materijala visoke tvrdoće, čvrstoće i žilavosti na povišenim temperaturama, kako bi se ovaj oblik trošenja izbjegao. Prilikom obrade mogu se pojaviti mikropukotine, koje se s vremenom šire i postepeno pune sitnim česticama kamena. Prilikom porasta temperature, čestice se šire te na oštricu djeluju kao klin koji razdvaja oštricu te tako može uzrokovati lom oštrice alata. [8]



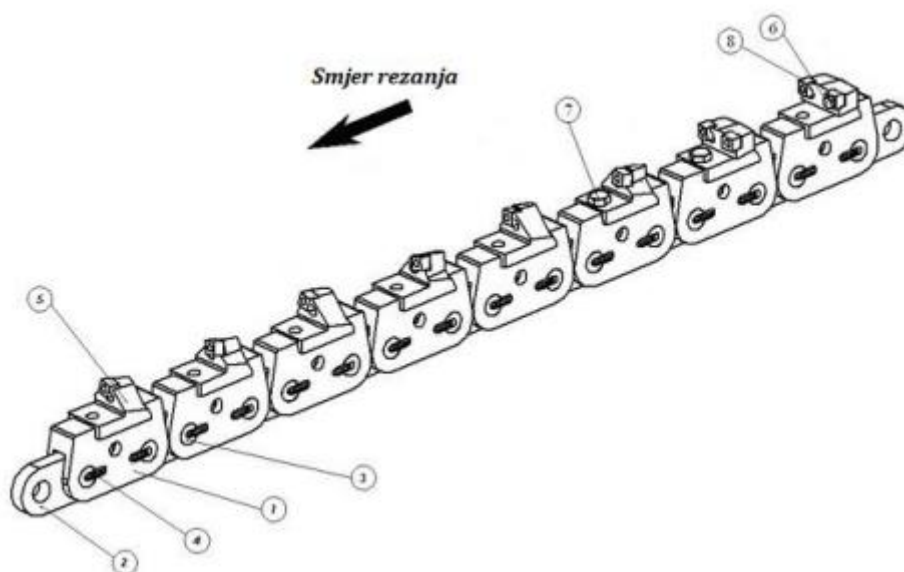
Slika 13. Trošenje uslijed umora materijala [8]

### 5.3. Podjela alata za obradu kamena

Postoji nekoliko vrsta alata, a dijele se ovisno o mogućoj implementaciji na pojedini stroj te samoj vrsti obrade u kojima ih je moguće primjenjivati kao i geometriji rezne oštrice samog alata.

### 5.3.1. Rezni lanac

Lanac se sastoji od članaka koji su međusobno povezani spojnica. Spojnice se učvršćuju pomoću zatika, a osiguravaju pomoću osigurača. Držači pločica se učvršćuju pomoću vijaka na članak lanca, a pločice pomoću vijaka na držač. Ovisno o vrsti stijene koja se pili, te o načinu piljenja (suhi ili mokri postupak) na lancu se pričvršćuje serija nosača pločica koja se sastoji od 5 do 8 komada. Prvih šest nosača imaju po jednu pločicu, dok ostala dva nosača zbog širine reza imaju po dvije pločice. Serija reznih segmenata na lancu ponavlja se naizmjenično, a njihov broj ovisi o duljini mača. [24]



Slika 14. Rezni alat lančane sjekačice [24]

Rezni element lančane sjekačice sastoji se od:

- 1) članka lanca,
- 2) spojnice,
- 3) klina,
- 4) osigurača klina,
- 5) držač pločice,
- 6) rezne pločice,
- 7) vijka nosača.

Prva rezna pločica u seriji služi sa otvaranje reza, a svaka slijedeća služi za proširivanje reza. Rezne pločice su simetrično postavljene čime je postignuta raspodjela ukupnih naprezanja odnosno smanjenje naprezanja po nosaču čime se postiže ravnomjerno piljenje i smanjenje opterećenja stroja. Raspored i položaj reznih pločica na reznom lancu ovisi o karakteristikama stijenske mase, a određen je konstrukcijom reznog lanca koja se razlikuje ovisno o proizvođaču. Pravac gibanja lanca može biti okomit ili pod određenim kutom u odnosu na smjer posmaka, a ovisi o položaju mača. Kod normalnog režima rada posmak sjekačice je konstantan, dok se opterećenje stroja mijenja ovisno o vrsti kamena odnosno ukupnom otporu rezanja. Brzinu posmaka potrebno je prilagoditi uvjetima odnosno otporima tijekom rezanja. [24]

### 5.3.2. Žica za piljenje

Žica za piljenje kamena izrađuje se kao sustav dijamantnih perli, opruga i drugih dijelova (distanceri, blokatori, spojnice) ili kao izvedba dijamantnih perli ili zrna s ili bez opruga na čeličnoj sajli obloženoj plastičnom oblogom. Prednost izvedbe s plastičnim zaštitnim oblogom na sajli je što štiti čeličnu sajlu od kamenog mulja koji može prouzročiti pucanje žice u radu. Osim što je žica rezni alat, ujedno je i vučni element postrojenja pa su njena vrsta, tehničke značajke i kvaliteta, uz svojstva stijene, presudni za efikasnost piljenja. Piljenje žicom rezultira tanjim rezom, visokom kvalitetom rezne površine i stvaranjem manje količine prašine. Dijamanta perla kao glavni dio alata je neodređene rezne geometrije. [25]

Postoje 3 osnovne vrste žice ovisno o dijamantnim perlama, a to su:

- galvanizirane,
- sinterirane,
- vakumske.



Slika 15. Žica za piljenje [25]

### 5.3.2.1. Galvanizirana žica

Postupak galvanizacije žice je najstariji postupak i najstarija vrsta žice koja se koristi. Velika količina dijamanta na površini može podržati suho rezanje i ima veću učinkovitost rezanja, ali nedostaci su kratak vijek trajanja. Navedena vrsta se danas sve rjeđe koristi. [25]

### 5.3.2.2. Sinterirana žica

Perla se formira hladnim prešanjem, a zatim se obrađuje sinteriranjem. Ova metoda sinteriranja može formirati stabilan rezni sloj, a dijamant se može dobro ugraditi u matricu praha legure, što uvelike jamči vijek trajanja rezanja. Nedostatak je taj što ova vrsta perle nije otporna na visoke temperature te je sklona je ispuštanju perli na visokoj temperaturi tako da je potrebna voda za hlađenje tijekom obrade. Ova vrsta žice za piljenje ima vrlo visoku cijenu, dobar životni vijek i dobru učinkovitost, tako da je trenutno najraširenija, bilo da se radi o rudarstvu, obradi kamena posebnog oblika ili rezanju blokova. [25]

### 5.3.2.3. Vakumska žica

Perla pile izrađena je lemljenjem u vakumu. Žica obrađena ovim postupkom ima vrlo grubu površinu i ima vrlo visoku učinkovitost rezanja, posebno za rudarenje mekog mramora te je vrlo učinkovita i podržava suho piljenje. Ima široku primjenu u rudarstvu mramora. Nedostatak ove vrste je taj što je oprema vrlo skupa, stoga je i cijena proizvoda visoka, a životni vijek relativno kratak. [25]

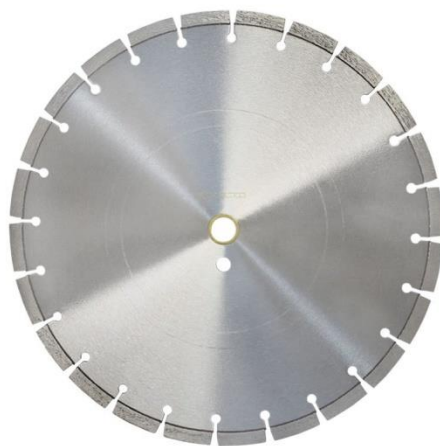
### 5.3.3. Rezni disk

Rezni disk s dijamantnom oštricom služi za rezanje tvrdih i abrazivnih materijala poput kamena. Postoje mnoge vrste dijamantnih oštrica i imaju mnoge namjene, uključujući rezanje kamena, betona i mnogih drugih materijala. Jedan od najvećih problema reznih diskova je pregrijavanje. Rezni disk je najkorišteniji alat za obradu kamena. Postoje 3 vrste reznih oštrica ovisno o namjeni i dinamici obrade, a to su: [26]

- segmentna rezna oštrica,
- kontinuirana rezna oštrica za suhu obradu,
- kontinuirana rezna oštrica za mokru obradu.

#### 5.3.3.1. Segmentna rezna oštrica

Obično je ova vrsta rezne oštrice podijeljena na 10 do 14 segmenata s dubokim utorom između svakog dijela. Segmentna rezna oštrica je izvrsna opcija kada nema hlađenja jer utori na oštrici omogućuju bolju izmjenu topline s okolinom. Zbog dizajna ove oštrice teže je dobiti čist rez. [27]



Slika 16. Segmentna rezna oštrica [27]



### 5.3.3.2. Kontinuirana rezna oštrica za suhu obradu

Kontinuirana rezna oštrica za suhu obradu ima mnogo sličnih značajki kao segmentna. Iako izgledaju vrlo različito, vrlo su slične. Jedna od najvećih razlika između kontinuirane rezne oštrice za suhu obradu i segmentne rezne oštrice je akumulacija topline. Oštricu nije potrebno hladiti rashladnim sredstvom budući da sama oštrica ima niz malih utora kako bi se omogućio bolji prijenos topline i učestalije hlađenje. Komercijalni naziv za ovu vrstu rezne oštrice je "turbo" rezna oštrica, a sam naziv dolazi od izgleda oštrice budući da izgleda poput turbo ventilatora. Budući da nije potrebno sredstvo za hlađenje, koristi se izraz suha obrada. [28]



**Slika 17. Kontinuirana rezna oštrica za suhu obradu [28]**

### 5.3.3.3. Kontinuirana rezna oštrica za mokru obradu

Ovaj tip oštrice često se naziva oštrica za mokro rezanje budući da nema mogućnost dobre distribucije topline poput drugih vrsta te je potrebno prisustvo rashladnog sredstva. Noževi kontinuiranog ruba obično su vrlo ravni s nekoliko detalja. Rashladno sredstvo također pomaže i u uklanjanju prašine. Oštrica s kontinuiranim rubom može proizvesti vrlo čist rez pri rezanju mramora, granita, porculanskih pločica i keramičkih pločica. Ova vrsta oštrice ostvaruje najmanju brzinu obrade. [27]



**Slika 18. Kontinuirana rezna oštrica za mokru obradu [27]**

### 5.3.3.4. Sile rezanja u obradi reznim diskom

Sile rezanja ovise o različitim parametrima. Geometriji reznog dijela alata, prisustvu rashladnog sredstva, brzini rezanja i slično, a mogu se mjeriti tijekom strojne obrade postavljanjem dinamometra ispod radnog komada. Mjeri se posmična i normalna posmična sila. Rezultantna sila računa se izrazom: [29]

$$R = \sqrt{F_f^2 + F_{fn}^2}$$

$R$  – rezultantna sila

$F_f$  – posmična sila

$F_{fn}$  – normalna posmična sila

Glavna i pasivna (natražna) sila rezanja može se izračunati preko rezultantne sile. [29]

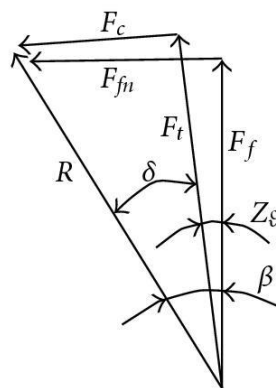
$$F_c = R \sin \delta$$

$$F_t = R \cos \delta$$

$F_c$  – glavna sila rezanja

$F_t$  – pasivna (natražna sila)

$\delta$  – kut između pasivne i rezultante sile (kut je preuzet sukladno s ostalim oznakama inicijalnog znanstvenog rada)



Slika 19. Sile rezanja reznog diska [29]

Ekvivalentna debljina odvojene čestice određena je dubinom rezanja, posmičnom brzinom i brzinom rezanja. [29]

$$h_{ep} = \frac{d_p \cdot v_f}{v_c}$$

$d_p$  – dubina rezanja

$v_f$  – posmična brzina

$v_c$  – brzina rezanja

Konačano, poznavajući ranije navedene iznose, moguće je izračunati i specifičnu energiju rezanja. [29]

$$E_c = \frac{F_c \cdot v_c}{v_f \cdot d_p \cdot b}$$

$b$  – debljina rezanja

#### 5.3.4. Svrkla

Svrklo je rezni alat za izradu provrta. Za obradu kamena pretežitno se koriste svrdla bez jezgre, odnosno krunska svrdla. Na taj način jezgra ostaje netaknuta i može se koristiti kao sirovac. Velika prednost ove vrste alata je što je potrebno ukloniti znatno manju količinu materijala nego klasičnim svrdlom, a ovisno o vrsti svrdla, bušenje je moguće obraditi bez ili uz prisutnost rashladnog sredstva. Postoji nekoliko vrsta svrdla, a to su: [30]

- sinterirana svrdla (za tvrdi kamen, granit i kvarc),
- galvanizirana svrdla (za mramor i meki kamen),
- segmentirana krunska svrdla (za granit i obrađeni kamen),
- kontinuirana krunska svrdla (za glatko bušenje rupa).



Slika 20. Svrkla za obradu kamena [30]

### 5.3.5. Alati za glodanje

Alati za glodanje su rezni alati koji se obično koriste na strojevima za CNC glodanje ili u obradama na obradnim centrima, a sastoje se nekoliko oštrica s kojima su u zahvatu s obratkom. Takva konstrukcija alata i oštrice omogućava odvajanje odstranjenog materijala i bolje hlađenje samog alata. Postoje različiti oblici za različite namjene i vrste obrade. Razlikuju se prstasta glodala i glodala za čeonu obradu. Također postoje galvanizirana i sinterirana glodala, a primjena pojedine vrste glodala ovisi o vrsti kamena koja se obrađuje te vrsti obrađivane površine. [31]



**Slika 21. Sinterirano glodalo za obradu kamena [31]**

Alati za čeonu glodanje cilindrični su i pretežito se koriste izvedbe sa segmentiranim oštricama. Osim navedenih, u obradi kamena koriste se prstasta glodala sa zaobljenim vrhom alata te alati za graviranje. Alati sa zaobljenim vrhom služe za obradu manjih utora.



**Slika 22. Alat za čeonu glodanje kamena [31]**

### 5.3.6. Profilni alati

Profilni alati specifični su po tome što su alati kojima se postiže gotova željena geometrija odnosno oblik obratka. Profilni alati rijetko se izrađuju za ne standardizirane dijelove budući da je njihova izrada izrazito skupa. Ukoliko nije riječ o velikim serijama, izrada je ekonomski neisplativa, ali postoje iznimke. Vrlo su precizni i rezultiraju odličnom kvalitetom obrađene površine. Profilni alati redovito se koriste za obradu ruba u izradi kuhinjskih i kupaonskih kamenih ploča kao i kod obrade stepenica, a koriste se i u obradi pogrebnih spomenika. Sinterirani alati za profiliranje namijenjeni su za obradu granita, dok su galvanizirana glodala namijenjena za obradu mramora. [31]



Slika 23. Alat za profiliranje [31]

### 5.3.7. Alati za poliranje

Alati za poliranje su diskovi različitih dimenzija i oblika. Diskovi za poliranje nemaju definiranu geometriju rezne oštrice. Trenjem između obratka i alata za poliranje dolazi do zagrijavanja alata i obratka, a sam proces naziva se poliranje. Poliranjem se postiže visoka kvaliteta obrađivane površine kao i nizak stupanj hrapavosti površine, uklanjaju se oksidacijski slojevi i popunjavaju se mikro udubljenja obratka. Postupak poliranja izvodi se u raznim smjerovima. Obrada se može vršiti sa i bez rashladnog sredstva, ovisno koju vrstu alata koristimo. Diskovi za poliranje izrađeni su od smole s velikom koncentracijom dijamanta. Moguće je također koristiti i prašak ili sapun za poliranje kamena. [32]



Slika 24. Alati za poliranje [31]

## 6. TRENDОВI U OBRADI KAMENA

U radu je dan pregled najčešće korištenih alatnih strojeva te alata za obradu kamenih materijala koji se danas koriste. Iako je navedeno područje industrijske proizvodnje jako staro i rašireno, neprestano se na tržištu pojavljuju nova rješenja alata i materijala reznog dijela. Na taj način povećava se produktivnost i ostvaruju se kraća vremena obrade s ciljem povećanja proizvodnje i boljom kvalitetom.

U nekim dosadašnjim alatima korišten je kobalt u vezivu umjesto metalnog praha. Kobalt ima manje štetan utjecaj na okoliš, a ujedno je i bezopasan za čovjekovo zdravlje. Veziva bez kobalta također je i jeftinije odlagati. [33]



## 7. ZAKLJUČAK

Obrada kamena poznata je kao ručna obrada koja zahtijeva puno vremena i pažnje. Kao takva izložena je mogućoj ljudskoj pogrešci, kako bi se navedeno izbjeglo sve se više primjenjuje strojna obrada kamena iako postoje izuzeci ukoliko se radi po posebnim zahtjevima ili obratku velikim dimenzija. Ipak, razvojem tehnologija, strojeva i novih alata smanjuju se sile rezanja što omogućava veću brzinu obrade kao i bolju kvalitetu obrađivane površine. Osim navedenog, novija geometrija alata omogućava obradu bez SHIP-a iako se njegova uporaba preporuča zbog nezahvalnog oblika odvojene čestice kamena. Budući da je industrija kamena u velikom usponu na globalnoj razini, sukladno tome je i tržište kamena sve veće vrijednosti što će omogućiti znatni razvoj u budućnosti. Bitno je naglasiti da su strojevi za navedenu obradu vrlo skupi, upravo iz razloga nagle potražnje i rasta tržišta, pa je samim time i finalnom proizvodu dodana vrijednost sukladno svim troškovima obrade.

## LITERATURA

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Rock\\_\(geology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rock_(geology)) - pristupljeno 02.02.2023.
- [2] <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-19-0302.pdf> - pristupljeno 02.02.2023.
- [3] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Sedimentne\\_stijene](https://hr.wikipedia.org/wiki/Sedimentne_stijene) - pristupljeno 02.02.2023.
- [4] [http://rgn.hr/~tkorman/nids\\_tkorman/Kamen/AGKAMEN/poglavlja/agkam01.pdf](http://rgn.hr/~tkorman/nids_tkorman/Kamen/AGKAMEN/poglavlja/agkam01.pdf) - pristupljeno 02.02.2023.
- [5] <https://tehnika.lzmk.hr/kamen/> - pristupljeno 02.02.2023.
- [6] [http://rgn.hr/~tkorman/nids\\_tkorman/Kamen/AGKAMEN/poglavlja/agkam02.pdf](http://rgn.hr/~tkorman/nids_tkorman/Kamen/AGKAMEN/poglavlja/agkam02.pdf) - pristupljeno 03.02.2023.
- [7] <https://repozitorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn%3A1421/datastream/PDF/view> - pristupljeno 03.02.2023.
- [8] Družinec D., Sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje - utjecaj na sile rezanja kod bušenja kamena, Diplomski rad, Rudarsko-naftno-geološki fakultet, Zagreb, 2018.
- [9] <https://hrcak.srce.hr/clanak/321576> - pristupljeno 03.02.2023.
- [10] [https://www.huadadiamond.com/chain\\_saw\\_machine](https://www.huadadiamond.com/chain_saw_machine) - pristupljeno 05.02.2023.
- [11] <https://repozitorij.rgn.unizg.hr/en/islandora/object/rgn%3A2033/datastream/PDF/view> - pristupljeno 05.02.2023.
- [12] [https://www.huadadiamond.com/double\\_blade\\_quarrying\\_machine/356.html](https://www.huadadiamond.com/double_blade_quarrying_machine/356.html) - pristupljeno 06.02.2023.
- [13] <https://www.stoneworld.com/articles/84091-features-and-benefits-to-consider-when-choosing-a-bridge-saw> - pristupljeno 06.02.2023.
- [14] <https://breton.it/products/machines-and-lines/breton-speedx> - pristupljeno 06.02.2023.
- [15] <https://breton.it/products/machines-and-lines/breton-paragon> - pristupljeno 06.02.2023.
- [16] [https://hr.wikipedia.org/wiki/CNC\\_upravljanje](https://hr.wikipedia.org/wiki/CNC_upravljanje) - pristupljeno 07.02.2023.
- [17] <https://www.scribd.com/doc/75039335/CNC-alatne-ma%C5%A1ine> - pristupljeno 07.02.2023.
- [18] <https://breton.it/products/machines-and-lines/breton-kinger> - pristupljeno 07.02.2023.
- [19] <https://hrcak.srce.hr/file/191149> - pristupljeno 07.02.2023.
- [20] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezni\\_alat](https://hr.wikipedia.org/wiki/Rezni_alat) - pristupljeno 07.02.2023.

- [21] A. Bhatangar, Manoj Khandelwal, K. U. M. Rao: Laboratory investigations for the Role of Flushing Media in Diamond Drilling marble, Roch Mech Rock Eng (2011) – Springer – Verlag (2011), 03.04.2011.
- [22] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrđi\\_metal](https://hr.wikipedia.org/wiki/Tvrđi_metal) - pristupljeno 05.02.2023.
- [23] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijamant> - pristupljeno 05.02.2023.
- [24] <https://hrcak.srce.hr/file/303654> - pristupljeno 05.02.2023.
- [25] <https://www.linxingstone.com/industry-news/diamond-wire-saw-classification.html> - pristupljeno 06.02.2023.
- [26] <https://crozierdiamondtools.com/3-diamond-saw-blade-types-uses/> - pristupljeno 06.02.2023.
- [27] <https://saxumtec.com/hr/disk-za-rezanje-kamena-mramora-i-granita/> - pristupljeno 06.02.2023.
- [28] <https://crozierdiamondtools.com/3-diamond-saw-blade-types-uses/> - pristupljeno 06.02.2023.
- [29] <https://www.hindawi.com/journals/amse/2010/631437/> - pristupljeno 10.02.2023.
- [30] <https://amastone.com/category/stone/cnc-tooling/> - pristupljeno 10.02.2023.
- [31] <https://www.diamut.com/en/stone/> - pristupljeno 10.02.2023.
- [32] <https://www.wehaus.com/Engineered-Stone-Diamond-Polishing-Pads-s/1867.htm> - pristupljeno 11.02.2023.
- [33] <https://stonespecialist.com/developments-stone-processing-machinery> - pristupljeno 11.02.2023.