

# Analiza trošenja alata kod finog glodanja kamena

---

Škrlin, Antonio

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:235:393287>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Antonio Škrlin**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Analiza trošenja alata kod finog glodanja kamena**

Mentor:

Doc.dr.sc. Miho Klaić, mag. ing.

Student:

Antonio Škrlin

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Mihi Klaiću na mentorstvu, svojoj pomoći, trudu, savjetima i podršci tijekom izrade ovog rada. Također, zahvaljujem dr. sc. Tamari Aleksandrov Fabijanić na pomoći i savjetima oko rezne pločice od nanostrukturiranih tvrdih metala. Zahvaljujem i dipl. ing. Zlatku Čatlaku na savjetima kod izrade tehničke dokumentacije alata.

Zahvaljujem tvrtki Alfa Tim d.o.o iz Zagreba na ustupljenom alatu iz projekta NANO PRO za ovo ispitivanje.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj obitelji, mami, tati i sestri za svu pruženu podršku i motivaciju tijekom studiranja.

Antonio Škrlin



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: **Antonio Škrlin** JMBAG: **0035222394**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza trošenja alata kod finog glodanja kamena**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Tool wear analysis in fine stone milling**

Opis zadatka:

Fakultet strojarstva i brodogradnje sudjeluje u projektu „Istraživanje i razvoj nanostrukturiranih tvrdih metala za razvoj novih proizvoda“ u suradnji s tvrtkom Alfa Tim d. o. o. radnog naziva "Nano Pro". Jedan od projektnih ciljeva je i razvoj novih tvrdometalnih materijala, te razvoj novih proizvoda na njihovoj osnovi. S druge strane, upotreba tvrdometalnih materijala za izradu reznog dijela alata za obradu kamena u neprestanom je usponu. Trendovi tržišta reznih alata za obradu kamena pokazuju povećanu upotrebu glodala za višeosne obrade namijenjenim za fino glodanje.

U sklopu završnog rada je potrebno:

1. Usporediti trošenje alata odabranog inozemnog proizvođača te alata iste geometrije proizvedenog u sklopu projekta NANO pro.
2. Dati kratak pregled i stanje tržišta alata za višeosnu obradu kamena
3. Iskazati trajnost alata u smjeru posmičnog gibanja
4. Dati zaključke rada.

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

Zadatak zadan:


30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Zadatak zadao:   
Doc. dr. sc. Miho Klaić

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. GLODANJE .....	5
2.1. Obodno ravno protusmjerno glodanje.....	7
2.2. Obodno ravno istosmjerno glodanje .....	8
2.3. Pet osna obrada.....	10
3. TVRDI METALI.....	12
3.1. Svojstva i primjena tvrdog metala.....	12
3.2. Podjela tvrdog metala u grupe.....	12
3.3. PVD ili Physical Vapour Deposition prevlake.....	14
3.4. CVD ili Chemical Vapour Deposition prevlake .....	14
4. KAMEN.....	15
4.1. Eruptivne ili magmatske stijene .....	15
4.1.1. Granit.....	15
4.2. Sedimentne ili taložne stijene.....	16
4.3. Metamorfne stijene.....	16
4.3.1. Mramor.....	16
4.4. Alati za obradu kamena .....	17
4.4.1. Ručni alati za obradu kamena .....	17
4.4.2. Strojni alati za obradu kamena .....	18
5. MEHANIZMI I POJAVNI OBLICI TROŠENJA ALATA .....	20
5.1. Mehanizmi trošenja alata.....	20
5.1.1. Abrazijsko trošenje.....	20
5.1.2. Adhezijsko trošenje .....	21
5.1.3. Difuzijsko trošenje .....	21
5.1.4. Oksidacijsko trošenje .....	22
5.1.5. Trošenje uslijed zamora materijala .....	22
5.2. Oblici trošenja alata.....	23
5.2.1. Trošenje stražnje površine alata .....	23
5.2.2. Kratersko trošenje .....	23
5.2.3. Plastična deformacija .....	24
5.2.4. Naljepak .....	24
5.2.5. Krzanje (krhanje).....	24
5.2.6. Zarezno trošenje .....	24
5.3. Parametri trošenja reznih oštrica alata.....	25
6. TRAJNOST ALATA U SMJERU POSMIČNOG GIBANJA .....	26
7. ISPITNI REZNI ALATI ZA FINO GLODANJE KAMENA.....	28
8. ISPITIVANJE TROŠENJA REZNIH OŠTRICA ALATA .....	32
8.1. Sivac Konavoski.....	32
8.2. CAM simulacija ispitivanja.....	33

---

8.2.1. Gruba obrada.....	35
8.2.2. Fina obrada.....	35
8.2.3. Snimanje trošenja nakon ispitivanja.....	36
8.2.4. Rezultati istraživanja.....	42
9. ZAKLJUČAK.....	43
10. LITERATURA.....	44
11. PRILOZI.....	46

**POPIS SLIKA**

Slika 1 Prva univerzalna tokarilica, Joseph Brown, 1862. [3] .....	1
Slika 2 Velika piramida u Gizi, Egipat [5] .....	2
Slika 3 Hram Partenon, Akropola .....	3
Slika 4 Rimski Koloseum [8] .....	3
Slika 5 Podjela postupaka obrade odvajanjem čestica prema DIN 8580 .....	5
Slika 6 Čeono glodalo [11] .....	6
Slika 7 Prstasto glodalo [12] .....	6
Slika 8 Podjela materijala za izradu reznih alata prema svojstvima [13] .....	7
Slika 9 Prikaz obodnog ravnog protusmjernog glodanja (lijevo sile koje djeluju na obradak, a desno parametri obrade) [15] .....	8
Slika 10 Prikaz obodnog ravnog istosmjernog glodanja (lijevo sile koje djeluju na obradak, a desno parametri obrade) [15] .....	8
Slika 11 Univerzalna glodalica [16] .....	9
Slika 12 Portalna glodalica [17] .....	10
Slika 13 Pet osna glodalica [19] .....	11
Slika 14 Granit .....	15
Slika 15 Mramor .....	17
Slika 16 Dlijetlo za obradu mramora (lijevo) i ručno dlijetlo (desno) [28], [29] .....	18
Slika 17 Univerzalno tvrdometalno glodalo za graviranje sferoidnog oblika [30] .....	19
Slika 18 Abrazijsko trošenje [2] .....	20
Slika 19 Adhezijsko trošenje [2] .....	21
Slika 20 Difuzijsko trošenje [2] .....	21
Slika 21 Oksidacijsko trošenje [2] .....	22
Slika 22 Trošenje uslijed zamora materijala [2] .....	22
Slika 23 Položaji i oblici trošenja reznih alata [2] .....	23
Slika 24 Parametri trošenja rezne oštrice alata [2] .....	25
Slika 25 Alat iz projekta NANO PRO .....	28
Slika 26 Komercijalni alat talijanskog proizvođača OMGF .....	30
Slika 27 CAD model alata NANO PRO .....	31
Slika 28 Intermac Compact Stone .....	32
Slika 29 Pripremak- ploča Sivca Konavskog .....	34
Slika 30 Izradak- valovi u ploči Sivca Konavskog .....	34
Slika 31 Prikaz putanje alata prizmatičnog grubog glodanja .....	35
Slika 32 Prikaz putanje alata kod operacije finog glodanja .....	36
Slika 33 Postav za snimanje istrošenosti alata .....	37
Slika 34 Industrijska kamera sa telecentričnim objektivom .....	37
Slika 35 Zaobljenje rezne oštrice 1 - NANO PRO .....	38
Slika 36 Trošenje stražnje površine alata 1- NANO PRO .....	38
Slika 37 Zaobljenje rezne oštrice 1- komercijalni alat .....	39
Slika 38 Lom rezne oštrice komercijalnog alata .....	39
Slika 39 Zaobljenje rezne oštrice 2 - NANO PRO .....	40
Slika 40 Stražnja površina oštrice 2- NANO PRO- nema značajnijih oštećenja .....	40
Slika 41 Zaobljenje rezne oštrice 2- komercijalni alat .....	41
Slika 42 Krzanje rezne oštrice 2- komercijalni alat .....	42



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1 Sastav i važnija svojstva tvrdih metala [20].....	13
Tablica 2 Usporedba parametara CVD i PVD postupaka prevlačenja [2].....	14
Tablica 3 Mehanička svojstva Sivca Konavoskog [31] .....	33

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$v_c$	m/min	brzina rezanja
D	mm	promjer reznog alata
$\pi$	/	Ludofov broj
n	1/min	učestalost vrtnje alata
$v_f$	mm/min	posmična brzina
$f_z$	mm	posmak po zubu (oštrici)
z	/	broj zubi (oštrica)
$\lambda$	°	kut nadvišenja rezne oštrice alata
T	min	postojanost rezne oštrice alata
m	/	eksponent Taylorove jednadžbe
$C_T$	/	Taylorova konstanta
$L_f$	m	duljina puta u smjeru posmičnog gibanja
$m_f$	/	Taylorov eksponent
$C_{L_f}$	/	Taylorova konstanta
SHIP	/	sredstvo hlađenja, ispiranja i podmazivanja
3D	/	trodimenzionalan
5D	/	petdimenzionalan
$h_{max}$	mm	najveća debljina odvojene čestice
CAM	/	proizvodnja podržana računalom (eng. computer aided manufacturing)
CAD	/	konstruiranje pomoću računala (eng. computer aided design)
KT	mm	dubina kratera na prednjoj površini alata
VB	mm	širina trošenja stražnje površine oštrice
$VB_{max}$	mm	maksimalna širina istrošenosti stražnje površine oštrice
KB	mm	širina kratera
KM	mm	udaljenost oštrice do središta kratera

**SAŽETAK**

Cilj ovog rada je napraviti analizu trošenja alata kod finog glodanja kamena. Upotreba tvrdih metala za izradu reznih dijelova alata za obradu kamena u velikom je usponu. U sklopu ovog rada napravljeno je eksperimentalno ispitivanje kojem je cilj usporediti trošenje komercijalnog alata za fino glodanje kamena s oštricom od tvrdog metala s trošenjem alata čija je rezna oštrica napravljena od nanostrukturiranog tvrdog metala. U prvom dijelu rada napravljen je pregled tehnologije obrade odvajanjem čestica glodanjem te pregled kamena kao materijala. Opisan je tvrdi metal kao materijal rezne oštrice alata te njegova nanostrukturirana inačica. Predstavljene su i oblici trošenja alata te kako se postojanost rezne oštrice alata izražava u smjeru posmičnog gibanja. U drugom dijelu rada nalazi se opis eksperimentalnog dijela rada. Napravljena je CAM simulacija samog ispitivanja trošenja nakon kojeg je provedeno snimanje reznih oštrica alata industrijskom kamerom. Na temelju snimaka trošenja alata nakon ispitivanja donesen je zaključak o trošenju alata.

Ključne riječi: glodanje, kamen, tvrdi metal, nanostrukturirani tvrdi metal, trošenje

---

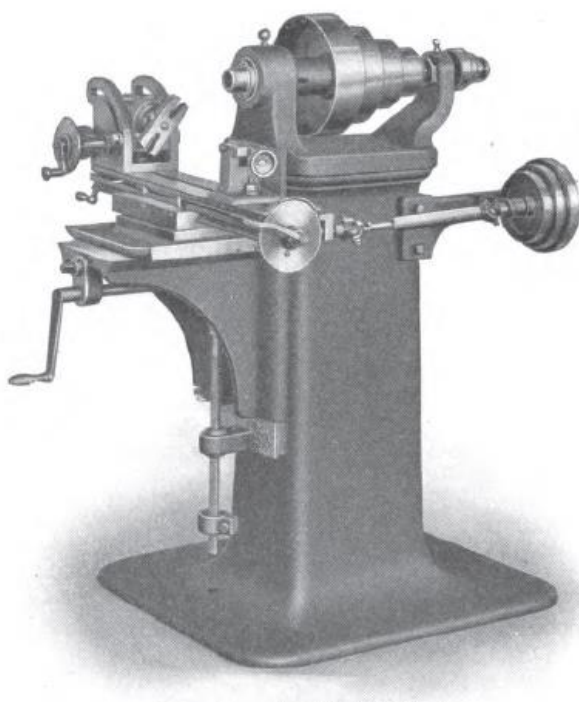
**SUMMARY**

Main objective of this paper is the tool wear analysis in fine stone milling. The usage of hard metal for making cutting parts of tools for fine milling of stone is in great rise. For this paper an experiment was made to compare wear of commercially available tool for fine stone milling with hard metal cutting blade and cutting tool with cutting blade made of nanostructured hard metal. In the first part of the paper there is given a overview of fine milling technology and stone as a material. Hard metal and its nanostructured version are described as a material for cutting part of the tool. There is also given an overview of types of wear and formulas for durability of cutting edges. In the second part of the paper there is a CAM simulation of examination after which was provided inspection of cutting edge with industrial camera. At the end there is given a conclusion based on recordings of wear after inspection.

Key words: milling, stone, hard metal, nanostructured hard metal, wear

## 1. UVOD

Razvoju prvog stroja za glodanje prethodio je razvoj strojeva za bušenje, tokarenje i blanjanje. Izum stroja za glodanje može se pripisati Amerikancima, kao što se izum bušilice i blanjalice pripisuje Britancima. Preteča glodalice razvijena je još 1664. godine kada je britanski znanstvenik Huck napravio stroj s kružnim pločastim glodalom. Amerikanci su ovaj stroj razvili sa željom za proizvodnjom što veće količine oružja. Prvi stroj za glodanje napravio je 1818. godine Whitney. Prvi univerzalni stroj za glodanje koji je sposoban izvršiti razne operacije koje se pred njega stavljaju unutar pogona napravio je Joseph Brown 1862. godine. Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica rezanjem, najčešće prizmatičnih obradaka budući da rezni alat glodalo ima oštrice čija je geometrija definirana. Prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine glodanje može biti grubo, završno i fino, a prema položaju reznih oštrica na glodalu obodno i čeno. Glodanjem se osim metalnih materijala mogu obrađivati i materijali poput kamena, plastike ili drveta. Važno je da materijal od kojeg je načinjena rezna oštrica alata za rezanje bude tvrdi od materijala koji se obrađuje. [1], [2]



**Slika 1** Prva univerzalna tokarilica, Joseph Brown, 1862. [3]

Od najranije ljudske povijesti spominje se kamen kao materijal. Kamen je prirodni materijal koji se dobiva nekim od postupaka obrade stijena, drobljenjem, rezanjem ili kalanjem. Stijene su kameni agregati od kojih je načinjena Zemljina kora. Po postanku stijene dijelimo na: eruptivne (magnatske), sedimentne (taložne) i metamorfne. Pretpostavlja se da je za ljude najvažnija prirodna pojava vatra nastala trenjem kamena o kamen u razdoblju paleolitika ili starijeg kamenog doba. Kameno je doba počelo upravo izradom prvog oruđa i alata od kamena što govori o njegovoj izrazitoj važnosti za ljude. Kamen se od najranije povijesti spominje i kao građevinski materijal. Poznato je da su egipatske piramide izrađene od velikih i teških kamenih blokova, često vapnenca i granita. [4], [5]



**Slika 2** Velika piramida u Gizi, Egipat [5]

Neizostavno je spomenuti i Akropolu na kojoj se nalazi hram Partenon izgrađen od mramora u dorskom stilu čiju je izgradnju predvodio kipar Fidija. [6]



**Slika 3** Hram Partenon, Akropola

Uz Grke, tu sa naravno i Rimljani. Rimski Koloseum izgrađen je od sedrenog krečnjaka, sedre, koji je vulkanska stijena i betonom obložene opeke. [7]



**Slika 4** Rimski Koloseum [8]

Tradicija gradnje u kamenu uvelike je prisutna i bogata u Hrvatskoj. Prisutna je ostavština još iz doba neolitika ili mlađeg kamenog doba u obliku suhozida i kamenih kuća na području Istre. Iz razdoblja Antike, poznato je da su Grci došli na otoke Vis, Hvar i Korčulu i tamo osnovali gradove pa se mogu naći mnogi ostatci građevina od kamena. Od ostavštine Rimljana najpoznatiji su Dioklecijanova palača u Splitu i pulski amfiteatar. Još od 7. stoljeća i dolaska Hrvata na ove prostore mogu se naći zapisi u kamenu poput Bašćanske ploče i natpis s imenom kneza Branimira. Iz svakog razdoblja moglo bi se naći mnogo važnih građevina od kamena od kojih su najpoznatije katedrala sv. Stošije u Zadru, katedrala sv. Jakova u Šibeniku, Dubrovačke zidine i mnoge druge. [9]

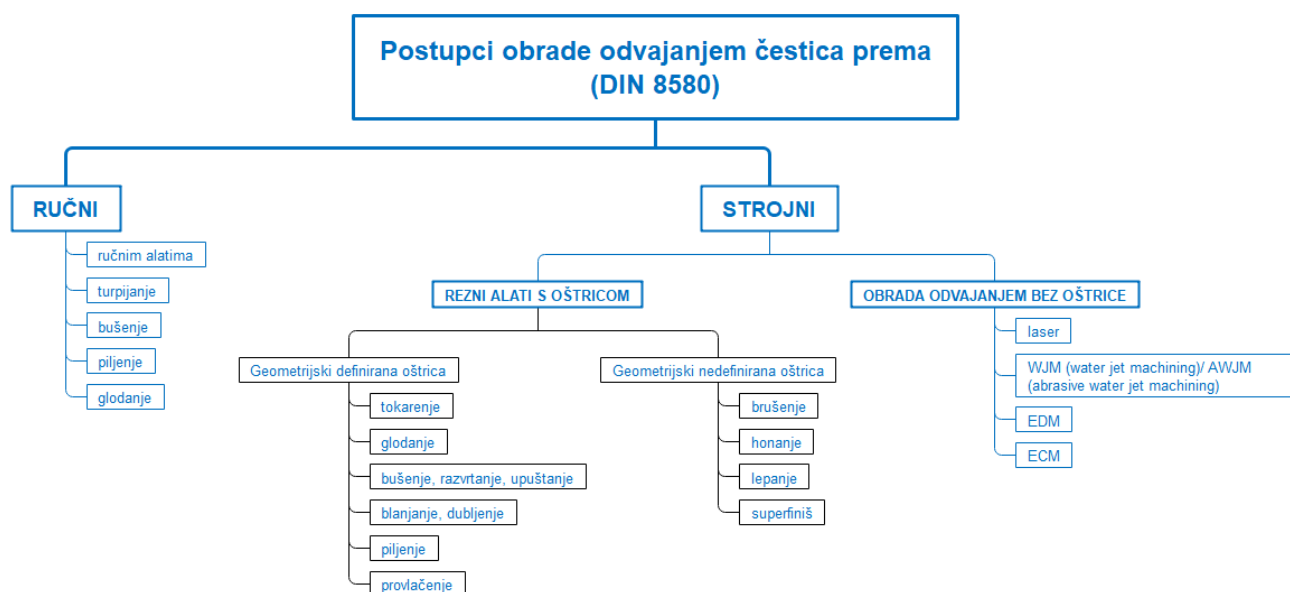
Tvrđi metal razvijen je zbog potrebe za zamjenom dijamanta kao materijala rezne oštrice. Za to se najbolji pokazao volfram karbid (WC). Početak upotrebe tvrdih metala vezan je uz razvoj postupka sinteriranja. Postupak sinteriranja razvila je tvrtka Krupp 1926. godine. Prvi tvrdi metal koji je tada proizveden nosio je naziv Widia budući da je bio tvrd kao dijamant. [10]

Trošenje je neizostavna pojava pri eksploataciji. Svaki alat se prilikom obrade u većoj ili manjoj mjeri troši. Postoje različiti mehanizmi i pojavni oblici trošenja. Sam proces trošenja vrlo je kompleksna pojava na koju još uvijek nisu dani svi odgovori.



## 2. GLODANJE

Glodanje je vrsta obrade odvajanjem čestica rezanjem. Prema podjeli postupaka obrade odvajanjem čestica DIN 8580 glodanje spada u strojne obrade s alatima s oštricom koja je geometrijski definirana.



Slika 5 Podjela postupaka obrade odvajanjem čestica prema DIN 8580

Površine koje se glodaju mogu biti proizvoljnog oblika iako se najčešće glodaju kutijasti (prizmatični) obratci. Glavno je gibanje kod glodanja kontinuirano kružno (rotacijsko) i pridruženo je alatu. Brzina rezanja je:

$$v_c = D \cdot \pi \cdot n \quad [\text{m/min}]$$

D označava promjer reznog alata [m], a n učestalost vrtnje alata [1/min].

Posmična gibanja i dostavna gibanja su kontinuirana pravocrtna, ali mogu biti i kružna, a pridružena su obratku ili alatu. Izraz za posmičnu brzinu glasi:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{m/min}]$$

$f_z$  označava posmak po zubu (oštrici) [m], z broj zubi (oštrica) glodala i n učestalost vrtnje glodala [1/min].

Alat za glodanje je glodalo definirane geometrije reznog dijela alata.

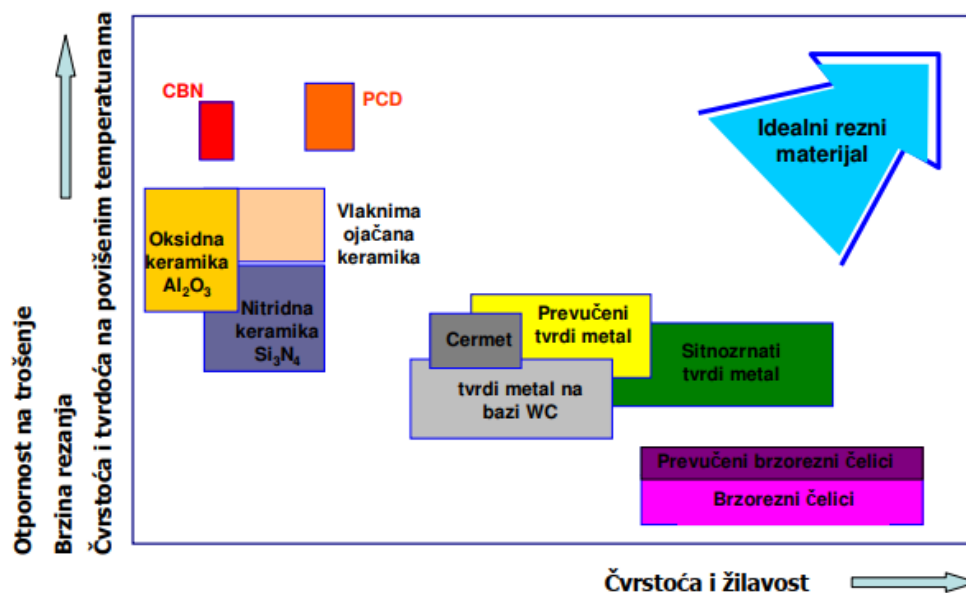


**Slika 6** Čeono glodalo [11]



**Slika 7** Prstasto glodalo [12]

Glodalo ima više glavnih reznih oštrica koje periodički ulaze u zahvat i izlaze iz njega pa je karakteristično za glodanje dinamičko opterećenje. U svakom trenutku se u zahvatu nalazi više reznih oštrica što osigurava mirniji rad. Cijelo glodalo najčešće se izrađuje od brzoreznog čelika, dok je rezni dio potrebno izraditi od materijala znatno veće tvrdoće od onog kojeg obrađujemo, a to su na primjer brzorezni čelici, cermet, keramika, CBN (kubični bor nitrid) te tvrdi metali.

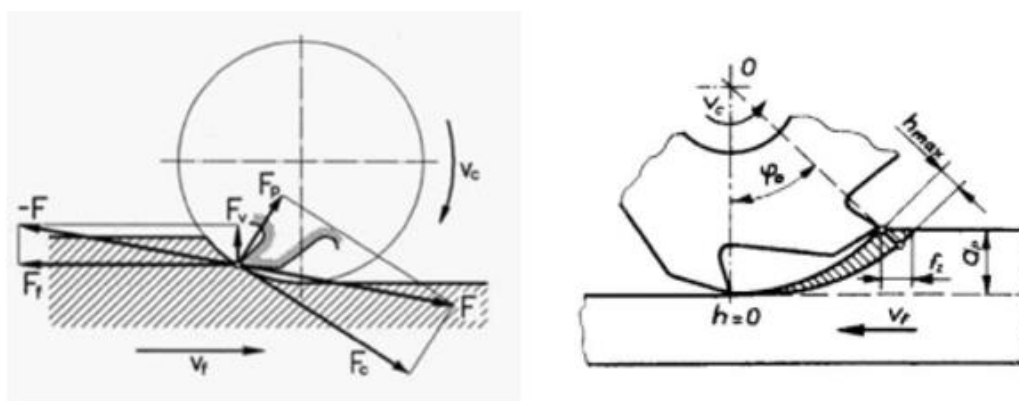


Slika 8 Podjela materijala za izradu reznih alata prema svojstvima [13]

Postupak glodanja se može podijeliti u pet kategorija. Prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine dijeli se na: grubo, završno i fino glodanje. Prema kinematici glodanje može biti istosmjerno i protusmjerno. S obzirom na položaj reznih oštrica na glodalu glodanje dijelimo na obodno i čeono te prema obliku obrađene površine na ravno, okretno profilno (utori i zupčanici), odvalno i oblikovno glodanje.

## 2.1. Obodno ravno protusmjerno glodanje

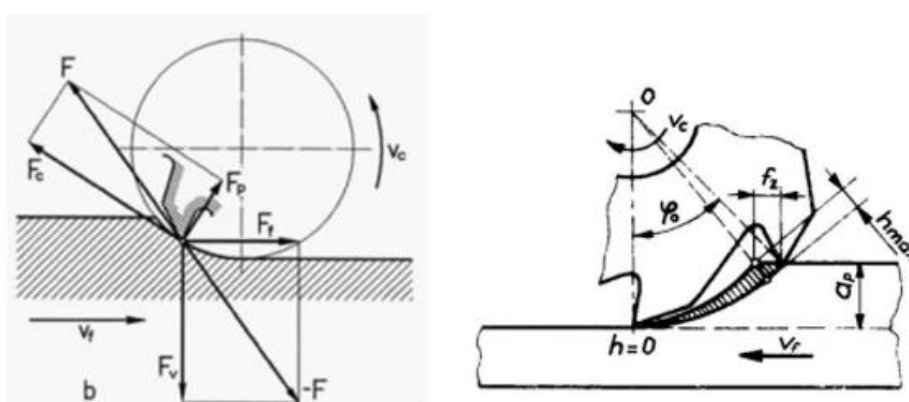
Protusmjerno glodanje slučaj je u kojem je obodna brzina glodala suprotna posmičnoj brzini obratka. Koristi se većinom na starijim alatnim strojevima koji imaju manju krutost, odnosno veću zračnost. Zbog kinematike procesa, sile glodanja nastoje iščupati obradak iz stezne naprave alatnog stroja. Debljina odvojene čestice kreće se od nule do maksimalne debljine  $h_{max}$ .



**Slika 9** Prikaz obodnog ravnog protusmjernog glodanja (lijevo sile koje djeluju na obradak, a desno parametri obrade) [15]

## 2.2. Obodno ravno istosmjerno glodanje

Istosmjerno glodanje slučaj je u kojem su obodna brzina glodala i posmična brzina obratka u istom pravcu. Koristi se većim dijelom na novijim, numerički upravljanim alatnim strojevima, koji zbog svoje konstrukcije imaju veliku krutost tj. malu zračnost. Kod istosmjernog glodanja sile glodanja nastoje gurati obradak u steznu napravu. Debljina odvojene čestice kreće se od maksimalne debljine  $h_{max}$  prema nuli, a kvaliteta obrađene površine koja se postiže bolja je u odnosu na slučaj protusmjernog glodanja.



**Slika 10** Prikaz obodnog ravnog istosmjernog glodanja (lijevo sile koje djeluju na obradak, a desno parametri obrade) [15]

Alatni strojevi na kojima se izvode operacije glodanja nazivaju se glodalice. Općenito se alatni strojevi sastoje od više modula (dijelova). Dijelovi alatnog stroja su: prigon za glavno gibanje, prigon za pomoćno gibanje, postolje koje služi za prihvat vodilica i ostalih sklopova alatnih strojeva, vodilica koje služe za vođenje i nošenje klizača, pribora za prihvat alata i pribora za prihvat obratka. Zadaća prigona za glavno gibanje je omogućiti glavno gibanje na alatnom stroju na kojem se formira odvojena čestica te mora omogućiti i promjenu vrijednosti gibanja. Zadaća je prigona za pomoćno gibanje omogućiti na alatnom stroju gibanje koje osigurava stalnost (kontinuitet) obrade odvajanjem čestica, a to je posmično gibanje (odnosno posmična brzina  $v_f$ ). Također, mora osigurati i dostavna gibanja kao što su primicanje i odmicanje te zauzimanje dubine obratka. Neke izvedbe tih alatnih strojeva su: univerzalna glodalica, horizontalna glodalica, vertikalna glodalica te portalna glodalica koja je zbog svoje konstrukcije preciznija i skuplja.



**Slika 11** Univerzalna glodalica [16]



Slika 12 Portalna glodalica [17]

Zahtjevi za unapređenjem i automatizacijom procesa doveli su do razvitka glodaćih obradnih centara koji omogućuju 3D i 5D obradu te razvoja glodaćih obradnih ćelija (fleksibilnih obradnih ćelija).

[2], [13], [14]

### 2.3. Pet osna obrada

U novije vrijeme pet osna obrada nailazi na sve veću primjenu u strojnoj obradi u odnosu na klasičnu tro-osnu obradu. Pet osna obrada sadrži tri klasične translacijske osi X, Y i Z te dvije dodatne rotacijske osi, A i C. Os A je rotacija oko osi X, dok je os C rotacija oko osi Y. Postojanje ove dvije dodatne osi omogućuje lakši pristup alata teško dostupnim područjima ako se radi o obradcima kompliciranih geometrija i s puno zakrivljenih površina, smanjenje vremena trajanja obrade i potencijalno manji broj potrebnih stezanja obradaka da bi se obrada izvršila u potpunosti. [18]



Slika 13 Pet osna glodalica [19]

### 3. TVRDI METALI

Tvrđi metal naziv je za metalno-keramički kompozit. „U grupu neoksidne keramike mogu se uvrstiti i keramički materijali pod svojim povijesnim imenom "tvrđi metali"“. [20] Iako pripadaju toj grupi, razlikuju se od ostalih neoksidnih keramičkih materijala zbog svojih izraženih metalnih svojstava kao što su toplinska i električna vodljivost. Mikrostruktura tvrdih metala sastoji se od visokog udjela volfram karbida (WC), titan karbida (TiC) i tantal karbida (TaC) povezanih nekim vezivom. Prah volfram karbida (WC) najčešće se upotrebljava kao matrica tvrdog metala. Kao vezivo najčešće se upotrebljava kobalt (Co). Karbidi iz mikrostrukture doprinose tvrdoći i otpornosti na trošenje, dok vezivo doprinosi žilavosti.

#### 3.1. Svojstva i primjena tvrdog metala

Neka od svojstava tvrdih metala su: visoko talište, visoka tvrdoća i otpornost na trošenje, visok modul elastičnosti, visoka tlačna čvrstoća i čvrstoća pri povišenim temperaturama, dobra postojanost na temperaturne promjene, dobra prionjivost s metalnim taljevinama, otpornost na koroziju i visoka toplinska i električna vodljivost. Tvrđi metali imaju široku primjenu za izradu alata za obradu odvajanjem čestica i dijelove strojeva. Najvažnije područje primjene je ipak za rezne alate za obradu odvajanjem čestica. Tvrđi metali za rezne alate dijele se u tri grupe.

#### 3.2. Podjela tvrdog metala u grupe

**Tvrđi metali grupe K** koriste se kod obrada materijala s kratkom odvojenom česticom. To su lijevovi na bazi željeza, porculan drvo, tvrđi polimerni materijali i kamen. Sadržaj volfram karbida (WC) iznosi oko 90%, titan karbida (TiC) i/ili tantal karbida (TaC) ima malo, od 0% do 4%, a sve ostalo je kobalt. Kada se obrađuju žilavi materijali stvaraju se naljepci zbog navarivanja odvojene čestice na reznu oštricu reznog alata.

**Tvrđi metali grupe M** većim dijelom sadrže volfram karbid (WC) od 80% do 85%. Titan karbida (TiC) i/ili tantal karbida (TaC) ima oko 10 %, a sve ostalo je kobalt. Upotrebljavaju se za obradu čelika do srednjih brzina rezanja te korozijski postojanih čelika.



**Tvrđi metali grupe P** imaju visok udio titan karbida (TiC) i tantal karbida (TaC), oko 43% pa su pogodni za obradu materijala s dugom odvojenom česticom, a moguće su i različite brzine obrade.

Sklonost eroziji i navarivanju odvojenih čestica koje stvaraju naljepak može se smanjiti dodatkom titan karbida (TiC) i tantal karbida (TaC) budući da su oni prevučeni otpornim oksidima. Titan karbid (TiC) doprinosi čvrstoći na povišenim temperaturama, tvrdoći i otpornosti na oksidaciju, ali smanjuje žilavost i čvrstoću reznih oštrica zbog toga što se loše povezuje s kobaltom što nije slučaj kod volfram karbida. Tantal karbid (TaC) bolje podnosi kobalt pa je smanjenje unutarnje čvrstoće vezivanja manje. Tantal karbid za razliku od titan karbida (TiC) povisuje žilavost i čvrstoću reznih oštrica što povećava sigurnost. Nedostatak tantal karbida (TaC) je to što je mekši pa je rezni učinak manji. Zbog svega navedenoga, razvila se potreba za razvojem višekomponentnih tvrdih metala čiji je sastav WC-TiC-TaC. U tvrdim metalima udio kobalta (Co) varira između 5% i 17%.

Srednji sastav				Gustoća kg/m <sup>3</sup>	Tvrdoća HV	Svojna čvrstoća N/mm <sup>2</sup>	Tlačna čvrstoća N/mm <sup>2</sup>
%							
WC	TiC	TaC	Co				
94	-	-	6	14900	1600	200	5500
85	-	-	15	14000	1200	2400	4100
92	-	2	6	14800	1650	1900	5700
70	12	8	10	12400	1430	1750	5000
75	4	8	13	12700	1350	1900	4700

**Tablica 1** Sastav i važnija svojstva tvrdih metala [20]

Da bi dobili istovremeno dobru otpornost na trošenje i žilavost, nanose se tanki slojevi na rezne oštrice. Prevlake koje je potrebno nanositi su: TiC, TiN, TiCN ili Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Debljine slojeva koji se nanose iznose od 5 μm do 15 μm i to postupcima PVD i CVD.

[20]

### 3.3. PVD ili Physical Vapour Deposition prevlake

PVD postupak izvodi se na temperaturama između 200 °C i 500 °C, a daje debljine prevlaka od 2 μm do 7 μm. Prevlake su: TiN, TiCN i TiAlN i moguće je prevlačenje u više slojeva, a primjenjuje se za bušenje, čeono glodanje i alate s oštrim bridom.

### 3.4. CVD ili Chemical Vapour Deposition prevlake

CVD postupak odvija se na temperaturama od oko 1000 °C i daje debljine od 2 μm do 14 μm. Prevlake su: TiC, TiN, TiCN ili Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Moguće je prevlačenje u više slojeva, a primjenjuje se za tokarenje, glodanje, obradu navoja i obradu utora.

[2]

Skraćenica	PVD	CVD
Naziv postupka	Physical Vapour Deposition	Chemical Vapour Deposition
Temperature prevlačenja	200 °C do 500 °C	1000 °C (MTCVD oko 800 °C)
Debljina prevlake	2 μm do 7 μm	2 μm do 14 μm
Materijali prevlake	TiN, TiCN i TiAlN	TiC, TiN, TiCN ili Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Više slojeva	Da	Da
Primjena	bušenje, čeono glodanje, alati s oštrim bridom	tokarenje, glodanje, obrada navoja, obrada utora

Tablica 2 Usporedba parametara CVD i PVD postupaka prevlačenja [2]

## 4. KAMEN

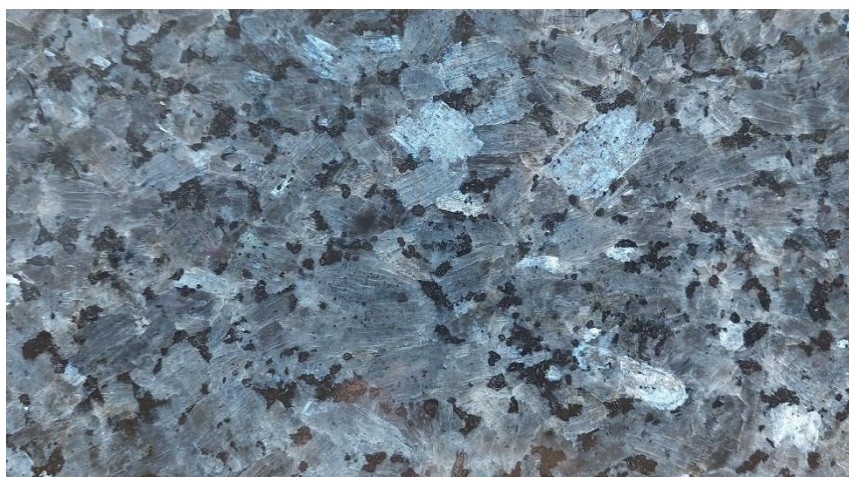
Stijene su kameni agregati od kojih je sagrađena Zemljina kora. Mogu biti načinjeni od jednog ili češće od više minerala tj. nakupina minerala koji mogu biti uglavnom silikatni, a rjeđe karbonatni. Po postanku stijene se dijele na: eruptivne (magnatske), sedimentne (taložne) i metamorfne. Od ovih vrsta stijena dobiva se prirodni kamen, a postoji i umjetni kamen. [21]

### 4.1. Eruptivne ili magnatske stijene

Eruptivne ili magnatske stijene nastaju skrućivanjem ili kristalizacijom magme to jest, lave. Sastoje se od kisika, silicija, aluminijska, željeza, magnezija, kalcija, natrija i kalija koji čine čvrste kemijske spojeve koji se nazivaju minerali. U ovoj vrsti stijena ima najviše silikatnih materijala koji tvore silicij koji na sebe veže metale i stvara spojeve silikate. Ostali se pojavljuju samo u tragovima. Eruptivne stijene čine 95% litosfere ili Zemljine kore. Prema mjestu postanka, načinu nastanka i strukturi dijele se na : dubinske, površinske i žične stijene. Dodatno se mogu podijeliti na dubinske i površinske. [22]

#### 4.1.1. Granit

Granit je zrnata magnatska stijena. Sastoji se od više mineralnih sastojaka. Tvrđi je od vapnenca i mramora. Granit je tehnički važan materijal iz kojeg se vade kositar, volfram, berilij, uranij itd. Svježi granit upotrebljava se kao građevni kamen, a od crvenkastog granita su u antici građeni spomenici i stupovi. Koristi se za popločavanje unutarnjih i vanjskih prostora zbog lijepog izgleda. [23]



Slika 14 Granit

## 4.2. Sedimentne ili taložne stijene

Sedimentne ili taložne stijene nastaju taloženjem mineralnog materijala različitog podrijetla. Najčešće se talože razoreni dijelovi površine Zemljine kore. Čestice materijala koje se talože nošene su vodom ili vjetrom i talože se najčešće u moru. Takva vrsta sedimenta naziva se mehanički sediment. Najpoznatiji predstavnici su glina i prapor. Druga skupina su kemijski sedimenti, na primjer natrijev klorid koji nastaje isparavanjem morske vode. Treća skupina su organogeni sedimenti koje talože biljke i životinje, a to su vapnenici, ali i dolomiti. Tu su najpoznatiji morski organizmi koji grade svoje kosture od kalcijeva karbonata. [24]

## 4.3. Metamorfne stijene

Metamorfne stijene nastaju preobrazbom prvih dviju skupina stijena, eruptivnih i sedimentnih. Preobrazba se odvija u uvjetima povišenog tlaka i temperature. Prema vrsti nastanka dijelimo ih na kontaktnometamorfne (preobrazba zbog utjecaja visoke temperature), dinamometamorfne (preobrazba zbog utjecaja visokog tlaka) i regionalmetamorfne (kada istovremeno djeluju visok tlak i temperatura). Regionalmetamorfizom nastaju škriljavec i gnajs, kontaktnometamorfizom nastaje kvarcit ili iz vapnenca mramor. [25]

### 4.3.1. Mramor

Mramor je vrsta metamorfne stijene. To je zrnasto-kristalični vapnenac s primjesima. Čisti mramor je bijele boje. Ako u sebi ima oksida postaje žut, smeđ ili crvenkast, ako ima grafita, ugljena ili bitumena postaje siv ili crn, a ako ima klorita zelenkast. Svojstva su mu: dobra obradljivost, lako rezanje i poliranje pa je pogodan za građevinu i kiparstvo zbog estetike. Mramor se može proizvesti i umjetno od finog bijelog gipsa, pigmenata i ljepila. Umjetni mramor je otporniji na trošenje i djelovanje kiselina od prirodnog. [26]



**Slika 15 Mramor**

Znanost koja se bavi proučavanjem stijena naziva se petrologija kao grana geologije.

Stijene se lome ručno, strojno ili eksplozivno. Stijena se tek nakon prerade u kojoj ne smije doći do promjene sastava naziva kamen i onda se može dalje upotrebljavati. Postupci kojima iz stijena dobivamo kamen su drobljenje, kalanje i rezanje. [21]

#### **4.4. Alati za obradu kamena**

Alati za obradu kamena mogu se primarno podijeliti na ručne i strojne.

##### **4.4.1. Ručni alati za obradu kamena**

Najjednostavniji ručni alat koji klesari koriste za obradu kamena su dlijetla. Dlijetla za kamen imaju reznu oštricu definirane geometrije, a oštrice se razlikuju prema vrsti dlijetla. Kako bi se kamen mogao obrađivati potrebno je glavno gibanje koje se u ručnoj obradi dobiva udarcima čekića o dlijeto. Dlijetla se izrađuju od čelika, najčešće onih koji se mogu zakaliti, a takav alat je potrebno često oštriti. U novije vrijeme vrh dlijeta također se izrađuje od tvdog metala povećavajući tako otpornost na trošenje i postojanost alata. [27]



Slika 16 Dlijetlo za obradu mramora (lijevo) i ručno dlijetlo (desno) [28], [29]

#### 4.4.2. Strojni alati za obradu kamena

Najčešći strojevi koji se primjenjuju za obradu kamena su strojevi za rezanje koji mogu biti konzolni ili portalni veće krutosti. Danas su, naravno, u upotrebi numerički upravljani alatni strojevi s više osi koji se koriste ne samo za rezanje već i za oblikovanje kamena slobodnih formi, najčešće postupkom glodanja. Za razliku od ručnih, strojni alati za obradu kamena većim dijelom koriste rezne alate s oštricom od tvrdog metala. Najčešće su to glodala različitih oblika koji posljedično ostavljaju različit oblik reza u kamenu. Druga vrsta alata za strojnu obradu kamena su takozvani galvanizirani alati. Načinjeni su od konstrukcijskog čelika ili čelika za automate i formirani u željeni oblik, a nakon toga se galvanizacijom na njega lijepe komadići tehničkog dijamanta. Takvi alati izrađuju se tokarenjem. Osnovno svojstvo im je dobra izdržljivost i rad na visokim brzinama rezanja. Njihov glavni nedostatak je da se lako oštete krivim rukovanjem. Ovakvim alatima može se raditi klasično s upotrebom SHIP-a koji je najčešće kod obrade kamena obična tehnička voda, ali i na suho. [27]



**Slika 17** Univerzalno tvrdometalno glodalo za graviranje sferoidnog oblika [30]

## 5. MEHANIZMI I POJAVNI OBLICI TROŠENJA ALATA

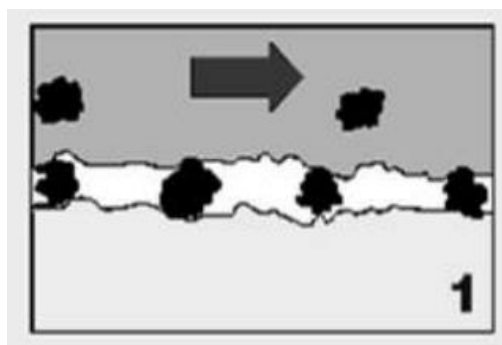
Kod svih procesa obrade odvajanjem čestica nemoguće je izbjeći trošenje rezne oštrice alata. Trošenje je posljedica opterećenja kojima je alat izložen tijekom obrade. Trošenja su najčešće mehaničke ili kemijske prirode.

### 5.1. Mehanizmi trošenja alata

Postoji pet osnovnih oblika trošenja alata. To su: abrazija, adhezija, difuzija, oksidacija i zamor.

#### 5.1.1. Abrazijsko trošenje

Abrazija je proces trošenja koji se gotovo uvijek javlja kod obrade odvajanjem čestica. Javlja se na nižim temperaturama. Nastaje zbog kontakta između alata i obratka. Tada neravnine na površini jednog, alata ili obratka, skidaju čestice materijala na drugom. Uzroci abrazije su nedovoljno podmazivanje, prevelika hrapavost površine ili krivo sredstvo za podmazivanje.

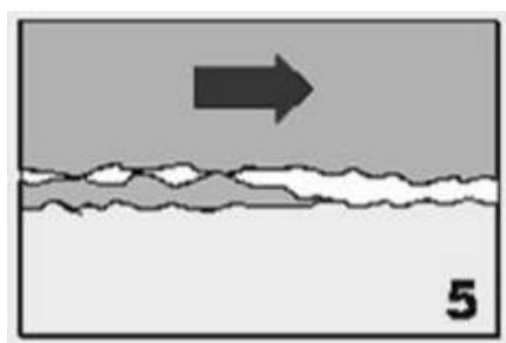


Slika 18 Abrazijsko trošenje [2]



### 5.1.2. Adhezijsko trošenje

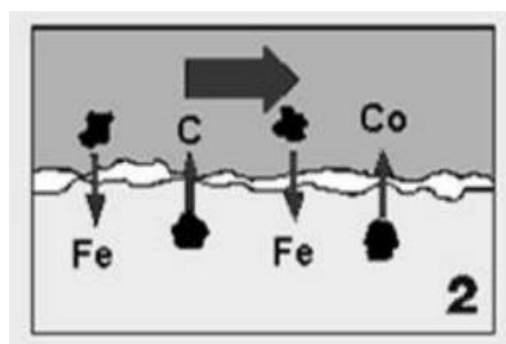
Adhezija je mehanizam trošenja kojeg karakterizira nalijepljivanje malih komada materijala obratka na reznu oštricu što stvara naljepak (eng. built up edge). Odvija se pri nižim temperaturama. Nakon nekog vremena dolazi do odvajanja (trganja) naljepka, a samim time dolazi i do odlamanja dijela rezne oštrice. Adhezija raste s porastom tlaka i pri većoj hrapavosti površine. Adhezija se može izbjeći povećanjem brzine rezanja.



Slika 19 Adhezijsko trošenje [2]

### 5.1.3. Difuzijsko trošenje

Difuzijsko trošenje je mehanizam trošenja koji se povećava s porastom temperature zato što tada dolazi do kemijskih promjena. Kod alata od tvrdog metala i keramike izrazito je prisutno. Jedan je od glavnih uzroka kraterskog trošenja na prednjoj površini alata. Najbolji način da se smanji difuzijsko trošenje je primjena  $Al_2O_3$  prevlaka.



Slika 20 Difuzijsko trošenje [2]

### 5.1.4. Oksidacijsko trošenje

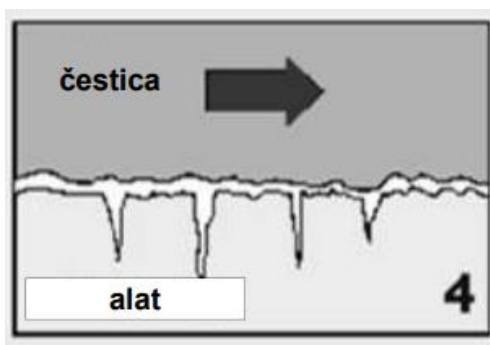
Oksidacijsko trošenje nastaje zbog prisutnosti zraka na povišenim temperaturama koje uzrokuju promjene unutar materijala alata. Oksidacija je najčešće prisutna na početku i na kraju oštrice. Oksidacija se može spriječiti pravilnim odabirom alata, aplikacijom prevlaka na alate ili primjenom alata od tvrdog metala.



Slika 21 Oksidacijsko trošenje [2]

### 5.1.5. Trošenje uslijed zamora materijala

Trošenje uslijed zamora materijala je oblik trošenja koji se najčešće javlja kod obrade odvajanjem čestica glodanjem zato što rezna oštrica ulazi i izlazi iz zahvata. Kad ulazi u zahvat opterećenje na reznju oštricu raste i ona se zagrijava, a kad izlazi opterećenje se smanjuje i oštrica se hladi i tako mnogo puta što može dovesti do zamora materijala. Da bi se izbjegao ovaj vid trošenja potrebno je koristiti materijale visoke tvrdoće, čvrstoće i žilavosti na povišenim temperaturama.

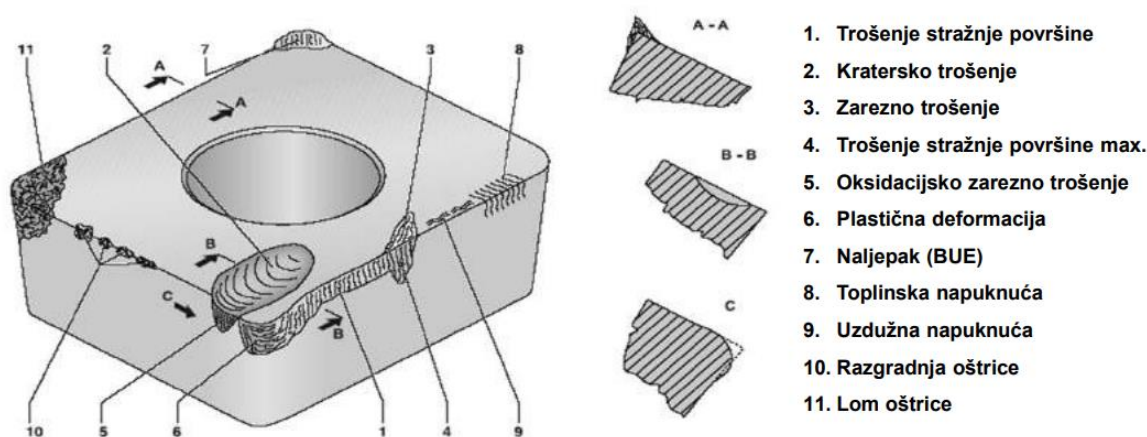


Slika 22 Trošenje uslijed zamora materijala [2]

## 5.2. Oblici trošenja alata

Ovisno o eksploatacijskim uvjetima u kojima se alat nalazi i mehanizmima trošenja pojavljuju se različiti oblici trošenja.

### Uobičajeni položaji i oblici trošenja reznih alata



Slika 23 Položaji i oblici trošenja reznih alata [2]

#### 5.2.1. Trošenje stražnje površine alata

Trošenje stražnje površine alata nastaje zbog kontakta stražnje površine alata i obrađene površine obratka. Najčešći su uzroci ovog oblika trošenja prevelika brzina rezanja, premali posmak i nedovoljna otpornost na trošenje. Ovaj oblik trošenja može se smanjiti smanjenjem brzine rezanja, povećanjem posmaka, povećanjem količine dobave i mjesta dobave sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP). [2], [32]

#### 5.2.2. Kratersko trošenje

Uzrok ovog tipa trošenja su previsoke temperature obrade. Ovaj oblik trošenja može se smanjiti odabirom alata otpornijeg na trošenje ili primjenom  $Al_2O_3$  prevlake te smanjenjem brzine rezanja.

### 5.2.3. Plastična deformacija

Plastična deformacija nastaje kad se u kombinaciji nađu visoka temperatura obrade i visoke vrijednosti režima obrade uslijed čega dolazi do velikih opterećenja alata uslijed velikih sila rezanja. Ovaj oblik trošenja može se smanjiti odabirom tvrdog alata te smanjenjem parametara obrade odnosno brzine rezanja i posmaka.

### 5.2.4. Naljepak

Naljepak se najčešće javlja na prednjoj površini alata. Najčešći uzrok stvaranja naljepka je premala brzina rezanja ili korištenje neodgovarajućeg alata. Ovaj oblik trošenja može se smanjiti odabirom žilavijeg alata koji bi trebao imati i PVD (eng. Physical Vapour Deposition) prevlaku te povećati brzinu obrade.

### 5.2.5. Krzanje (krhanje)

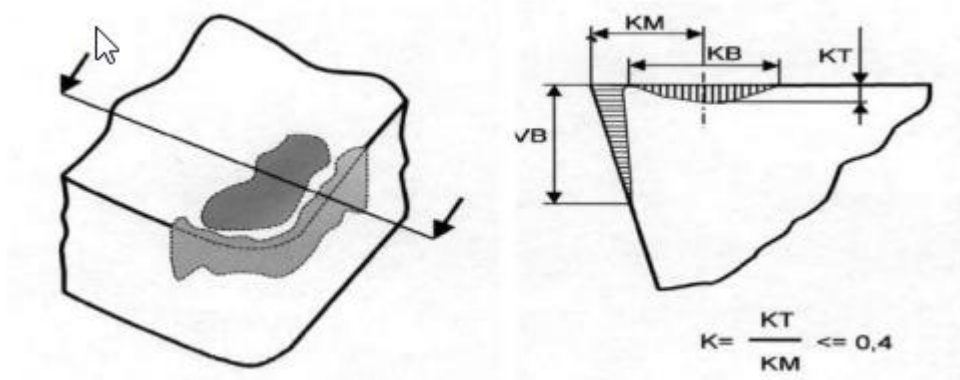
Glavni uzrok ovog vida trošenja su odvojene čestice koje se savijaju prema oštrici. To se javlja zbog negativnog kuta nadvišenja oštrice  $\lambda$ . Ovaj oblik trošenja može se smanjiti promjenom posmaka ili promjenom geometrije rezne oštrice odnosno kuta nadvišenja.

### 5.2.6. Zarežno trošenje

Zarežno trošenje nastaje zbog nedovoljne otpornosti na trošenje i prevelike brzine rezanja. Ovaj oblik trošenja može se smanjiti odabirom alata otpornijeg na trošenje ili smanjenjem brzine rezanja.

### 5.3. Parametri trošenja reznih oštrica alata

Kada alat više ne može dobro obavljati funkciju koja mu se zadaje kaže se da je prošao njegov vijek trajanja. Za kriterije postojanosti mogu se uzeti granične vrijednosti parametara obratka poput hrapavosti površine ili dimenzija, ali i mjerljive veličine procesa poput sila, momenata ili vibracija. Za klasifikaciju trošenja najčešće se koriste parametri VB, VBmax i KT. Kod grubih obrada koriste se parametri VB i KT. Za završnu obradu kao parametar istrošenosti koristi se hrapavost obrađene površine Ra. Trošenje se definira kao funkcija brzine rezanja, posmaka, dubine rezanja, SHIP-a, materijala obratka, materijala alata i stroja. Najveći utjecaj na trošenje ima brzina rezanja. S povećanjem brzine rezanja postojanost alata pada.



Slika 24 Parametri trošenja rezne oštrice alata [2]

[2]

## 6. TRAJNOST ALATA U SMJERU POSMIČNOG GIBANJA

Postojanost oštrice alata moguće je definirati na tri načina. Prvi je način postojanost definirana vremenom koje alat može provesti u obradi dok ne dođe do dozvoljenog istrošenja alata (kriterijsko trošenje). Drugi je način definiranje postojanosti duljinom puta u smjeru glavnog gibanja. Ovakav se način definiranja postojanosti pretežito koristi kod provlačenja, a kod ostalih postupaka obrade nije primjenjiv. Treći je način postojanost definirana duljinom puta u smjeru posmičnog gibanja. Ovaj se način najčešće koristi kod postupaka brušenja, ali može naći primjenu i u ostalim postupcima obrade odvajanja pa tako i u glodanju. Baza sva tri načina definiranja postojanosti je Taylorova jednadžba koja glasi:

$$v_c \cdot T^m = C_T$$

$v_c$  predstavlja brzinu rezanja [m/min],  $T$  postojanost rezne oštrice alata,  $m$  eksponent Taylorove jednadžbe i  $C_T$  Taylorova konstanta.

Taylorova konstanta  $C_T$  ima i fizikalni smisao, a to je da predstavlja brzinu pri kojoj bi postojanost alata iznosila jednu vremensku jedinicu.

Izraz za duljinu puta u smjeru posmičnog gibanja izražen preko brzine rezanja glasi:

$$L_f = v_f \cdot T$$

iz čega slijedi da je postojanost:

$$T = \frac{L_f}{v_f}$$

Definicija posmične brzine glasi:

$$v_f = f \cdot n$$

gdje je  $f$  posmak [mm/zubu (oštrici)], a  $n$  broj zubi (oštrica).

Broj okretaja izražen je preko brzine rezanja:

$$n = \frac{v_c}{D \cdot \pi}$$

Uvrštavanjem u gornji izraz slijedi da je postojanost:

$$T = L_f \cdot \frac{D \cdot \pi}{v_c \cdot f}$$

Tako dobiveni izraz potrebno je uvrstiti u osnovnu Taylorovu jednadžbu

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

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

$$\frac{m}{1-m} = m_f$$

Iz čega slijedi konačan izraz za trajnost alata u smjeru posmičnog gibanja:

$$v_c \cdot L_f^{m_f} = C_{L_f}$$

[33]

## **7. ISPITNI REZNI ALATI ZA FINO GLODANJE KAMENA**

U sklopu ovog rada potrebno je napraviti usporedbu trošenja reznog alata odabranog inozemnog proizvođača te alata iste geometrije proizvedenog u sklopu projekta NANO PRO.

Fakultet strojarstva i brodogradnje sudjeluje u projektu „Istraživanje i razvoj nanostrukturiranih tvrdih metala za razvoj novih proizvoda“. Cilj projekta je u suradnji s tvrtkom Alfa Tim d.o.o razviti nove nanostrukturirane tvrde metale i proizvode od istih, među kojima je i ovo glodalo čija je rezna oštrica izrađena od nanostrukturiranog tvrdog metala.



**Slika 25** Alat iz projekta NANO PRO



## 7.1. NANOSTRUKTURIRANI TVRDI METALI

Za izradu reznog dijela alata korišteni su nanostrukturirani tvrdi metali. Tvrdi metal dobiven je postupkom metalurgije praha. Metalurgija praha postupak je izrade dijelova iz praha koji je prethodno sprešan i zagrijan na temperaturu nešto manju od temperature taljenja. Postupak metalurgije praha sastoji se od četiri dijela. Prvo je potrebno proizvesti prah, zatim kreirati mješavinu prahova, napraviti prešanje i na kraju sinteriranje. Postupke metalurgije praha moguće je podijeliti u dvije osnovne skupine: konvencionalni postupci metalurgije praha i postupci kojima se postižu teorijske gustoće [21]. Za dobivanje reznog dijela alata „NANO PRO“ korišten je prah volfram karbida (WC) kao polazni prah. Matrica je kobalt (Co) koji popunjava pore, a koji se zbog dobre oblikovljivosti i topljivosti na temperaturi sinteriranja najčešće koristi kao matrica. Mješavini prahova dodani su i inhibitori rasta zrna koji sprječavaju rast zrna i povišuju tvrdoću. Veličina zrna u sinteriranom alatu iznosi približno 200  $\mu\text{m}$ . Manja zrna polaznog praha WC-a daju bolja mehanička svojstva, u prvom redu povećavaju tvrdoću. Sinter-HIP postupak je korišten za izradu tvrdometalnog alata. Sinter-HIP postupak pogodan je za dobivanje složenih oblika teoretske gustoće pomoću postupka sinteriranja u tekućoj fazi, najčešće vakuumu, nakon kojeg slijedi vruće izostatičko prešanje (eng. HIP- hot isostatic pressing).[21] Sve mješavine polaznih prahova pripremljene su u Laboratoriju za metalurgiju praha na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. [34]

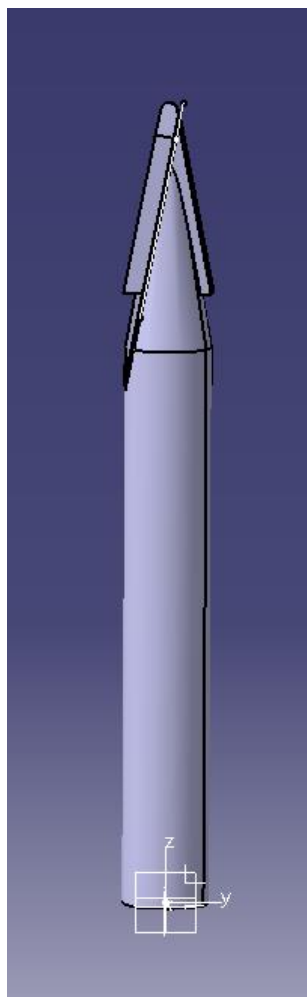
Za usporedbu je odabran alat reljefno glodalo sa cilindričnom drškom (it. FRESE PER BASSI E ALTORILIEVI - ATTACCO CILINDRICO) talijanskog proizvođača Officina Martello di Giorgi F.LLI s.r.l. (u daljnjem tekstu samo OMGF), kataloške oznake FCIL3.



**Slika 26** Komercijalni alat talijanskog proizvođača OMGF

## **7.2. CAD MODEL NANO PRO ALATA**

Prije samog ispitivanja, potrebno je u potpunosti definirati alat „NANO PRO“ i geometriju njegove rezne oštrice. Za potrebu toga, izrađen je CAD model alata u programskom paketu Dassault Systems CATIA, V5R21.



**Slika 27** CAD model alata NANO PRO

Na temelju ovog CAD modela izrađena je tehnička dokumentacija alata NANO PRO koja se nalazi kao prilog na kraju ovog rada. Tamo je opisano kako se izrađuje ovakav alat.

## 8. ISPITIVANJE TROŠENJA REZNIH OŠTRICA ALATA

Ispitivanje trošenja reznih pločica alata izvršeno je na stroju Intermac Compact Stone, stroju za CNC obradu kamena. Snaga glavnog motora je 7500 W, a maksimalna brzina vrtnje je 15000 1/min.



Slika 28 Intermac Compact Stone

Ispitivanje je izvršeno na kamenoj ploči dimenzija 300x300x80 mm. Ploča je izrezana iz većeg komada Sivca Konavoskog.

### 8.1. Sivac Konavoski

Sivac Konavoski kamen je svijetlo sive boje. Sastavljen je od 80,94% dolomita i 18,6% kalcita koji je svrstan u dolomite. Sivac je većinski homogene strukture, ali sadrži i dijelove s milimetarskim kalcitnim venama koje se pružaju pravocrtno u duljini od oko 100 mm.

U tablici u nastavku prikazana su najvažnija mehanička svojstva Sivca Konavoskog .

[31]

Vrsta kamena	Sivac Konavoski
Tlačna čvrstoća	$P_{\text{pros}} = 136,8 \text{ N/mm}^2$
Upijanje vode	$\vartheta = 2,08\%$
Prostorna masa	$P = 2570 \text{ kg/m}^3$
Poroznost	$P = 5,2\%$
Tvrdoća*	$1815 \text{ N/mm}^2$

**Tablica 3** Mehanička svojstva Sivca Konavoskog [31]

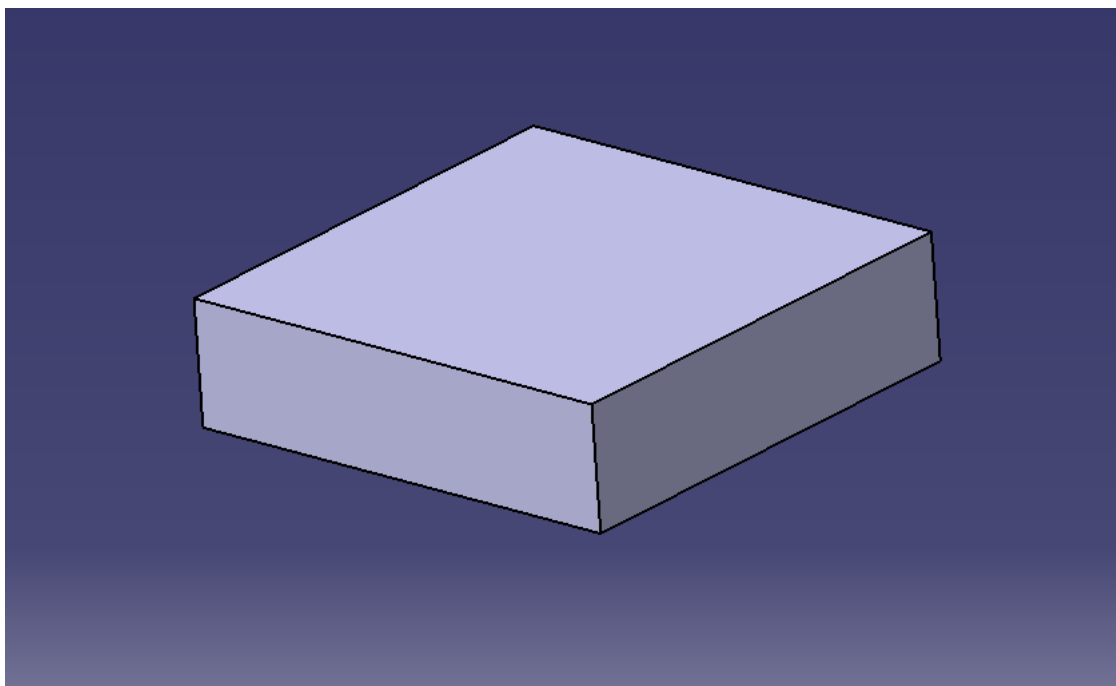
\*Tvrdoća je dobivena mjerenjem Knoop-ovom metodom u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Nakon izrezivanja sirovca uslijedilo je samo ispitivanje trošenja alata. Na ploči Sivca Konavoskog glodani su valovi. Prvo je napravljena gruba obrada galvaniziranom dijamantnom kuglom promjera 20 mm za obradu kamena, a zatim fina obrada alatima čije se trošenje ispituje. Oznakom A1 označen je komercijalni alat talijanskog proizvođača OMGF. Oznakom A2 označen je alat iz projekta NANO PRO, tvrtke Alfa Tim d.o.o. Ispitivanje je provedeno s jednim primjerkom od svakog alata. Sa svakim alatom napravljena su tri izratka.

## 8.2. CAM simulacija ispitivanja

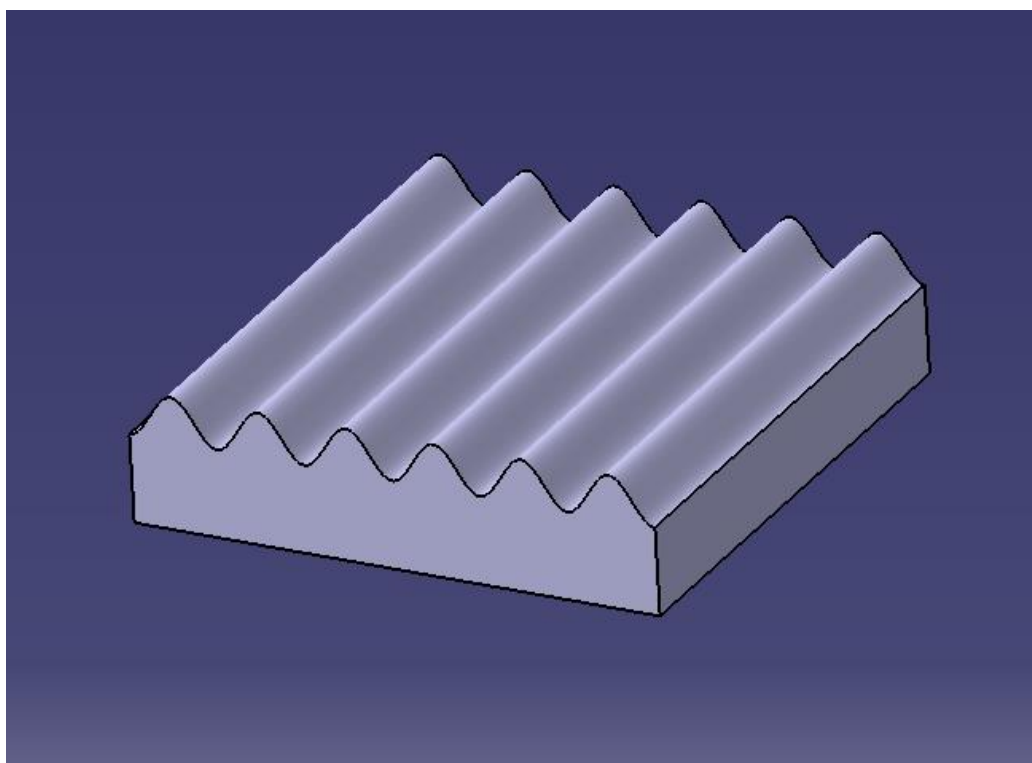
U nastavku se nalazi CAM simulacija usporednog ispitivanja trošenja alata kod finog glodanja. Simulacija je napravljena u programskom paketu Dassault Systems CATIA V5R21.

Pripremak je ploča Sivca Konavskog dimenzija 300x300x80.



**Slika 29** Pripremak- ploča Sivca Konavskog

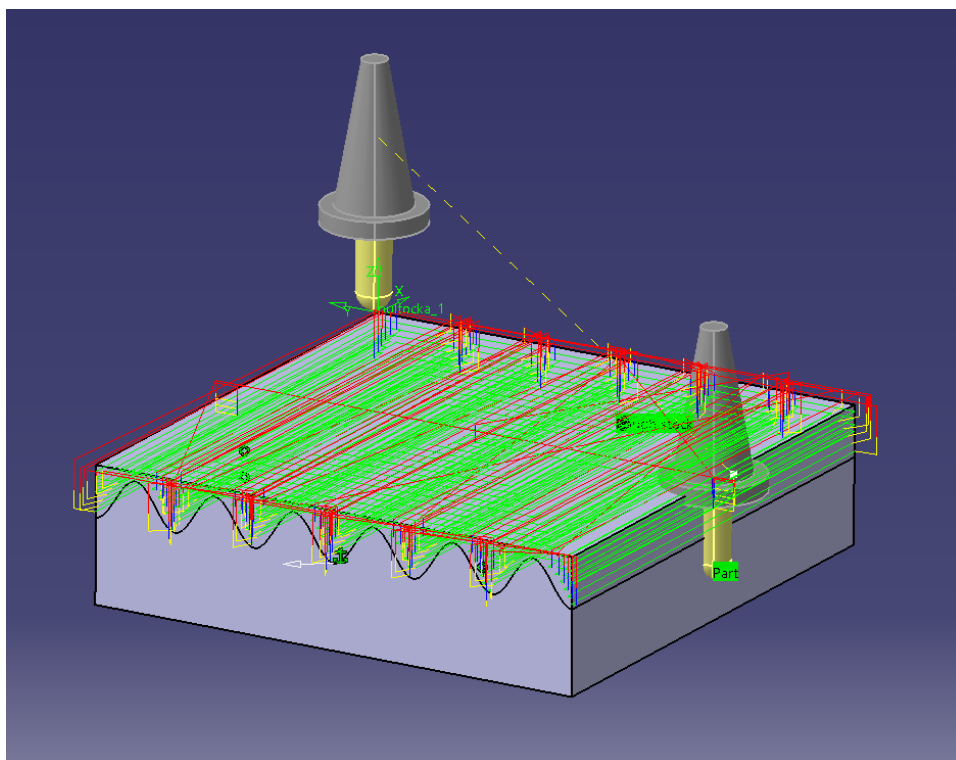
Napravljen je model izratka koji se dobio nakon ispitivanja. Prvo je napravljeno grubo glodanje, a zatim fino glodanje.



**Slika 30** Izradak- valovi u ploči Sivca Konavskog

### 8.2.1. Gruba obrada

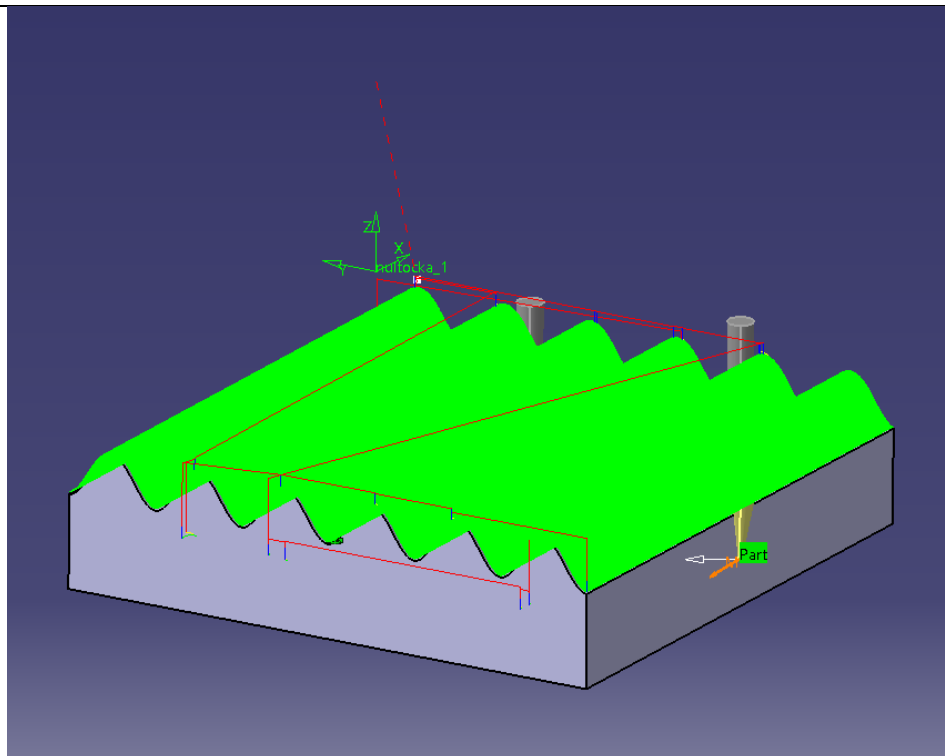
Gruba obrada simulirana je pomoću operacije prizmatičnog grubog glodanja (eng. prismatic roughing). Dubina obrade iznosi 4 mm, a posmična brzina 500 mm/min. Ovom operacijom napravljeno je poravnavanje ploče Sivca Konavoskog i poglodana je gruba kontura valova koji su potrebni za finu obradu i samo ispitivanje.



Slika 31 Prikaz putanje alata prizmatičnog grubog glodanja

### 8.2.2. Fina obrada

Fina obrada simulirana je pomoću operacije finog glodanja (eng. sweeping). Dubina obrade je 5 mm, a posmična brzina 500 mm/min. Pomoću ove operacije napravljena je točna kontura valova u kamenu. Radijalni pomak definiran je u iznosu od 0.18 mm. Ispitivanje svakog alata trajalo je 36 sati.



Slika 32 Prikaz putanje alata kod operacije finog glodanja

### 8.2.3. Snimanje trošenja nakon ispitivanja

Nakon provedenog ispitivanja potrebno je snimiti alate i pronaći pojavne oblike trošenja te ih izmjeriti. Snimanje je provedeno pomoću postava na kojem se nalazi industrijska kamera (tip DFK24UP031) proizvođača The Imaging Source (Njemačka) i telecentričnog objektiva (tip TC2309) proizvođača Opto Engineering S.r.l. (Italija)



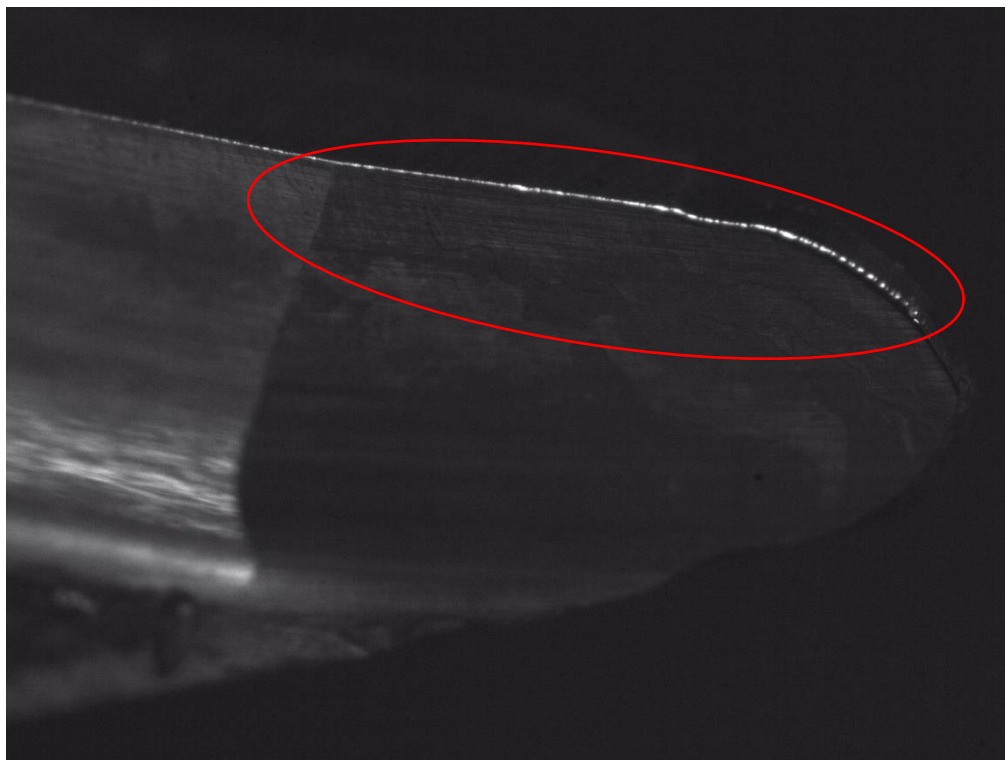


Slika 33 Postav za snemanje istrošenosti alata

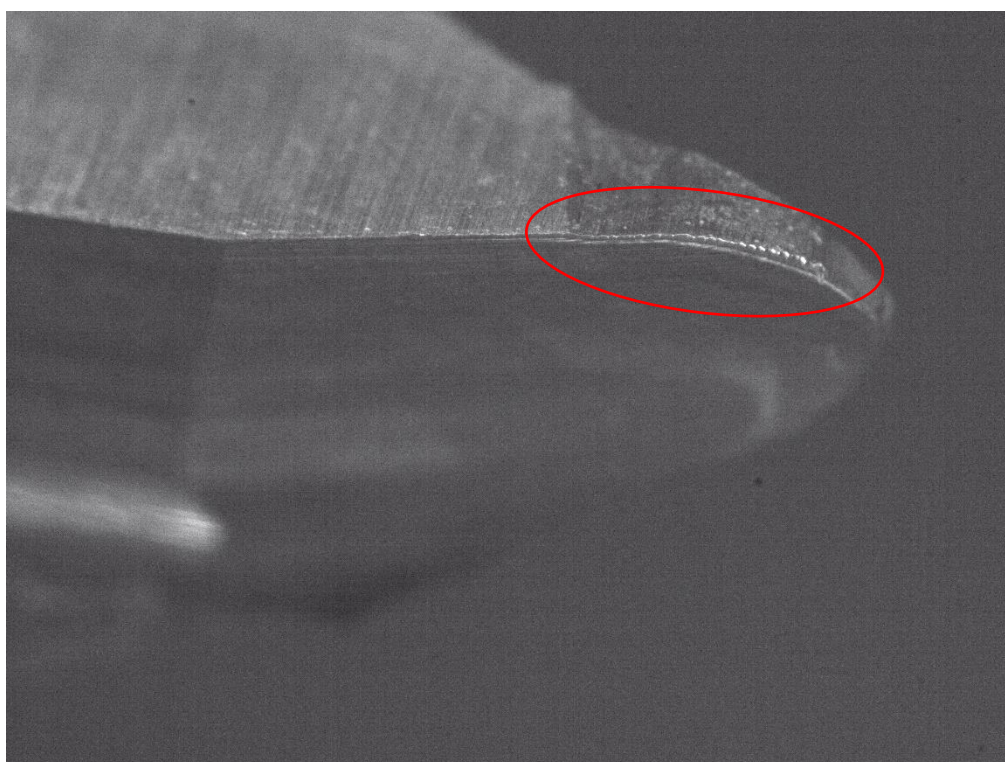


Slika 34 Industrijska kamera sa telecentričnim objektivom

U nastavku se nalaze snimke reznih alata nakon ispitivanja zabilježene pomoću industrijske kamere s telecentričnim objektivom.

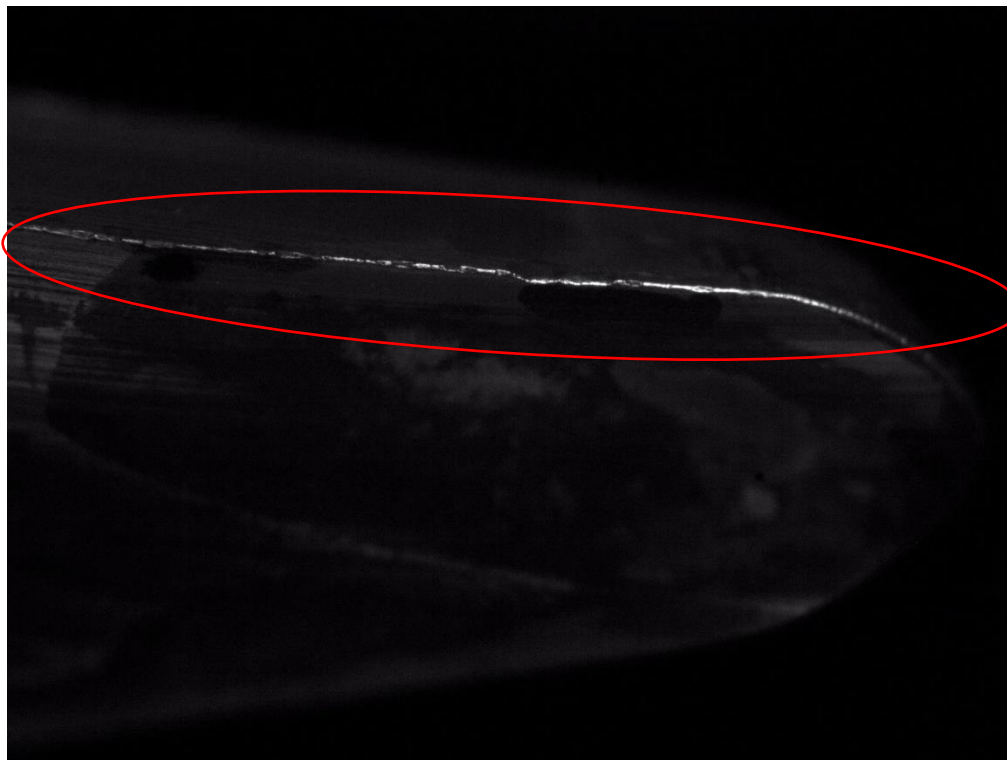


**Slika 35** Zaobljenje rezne oštrice 1 - NANO PRO

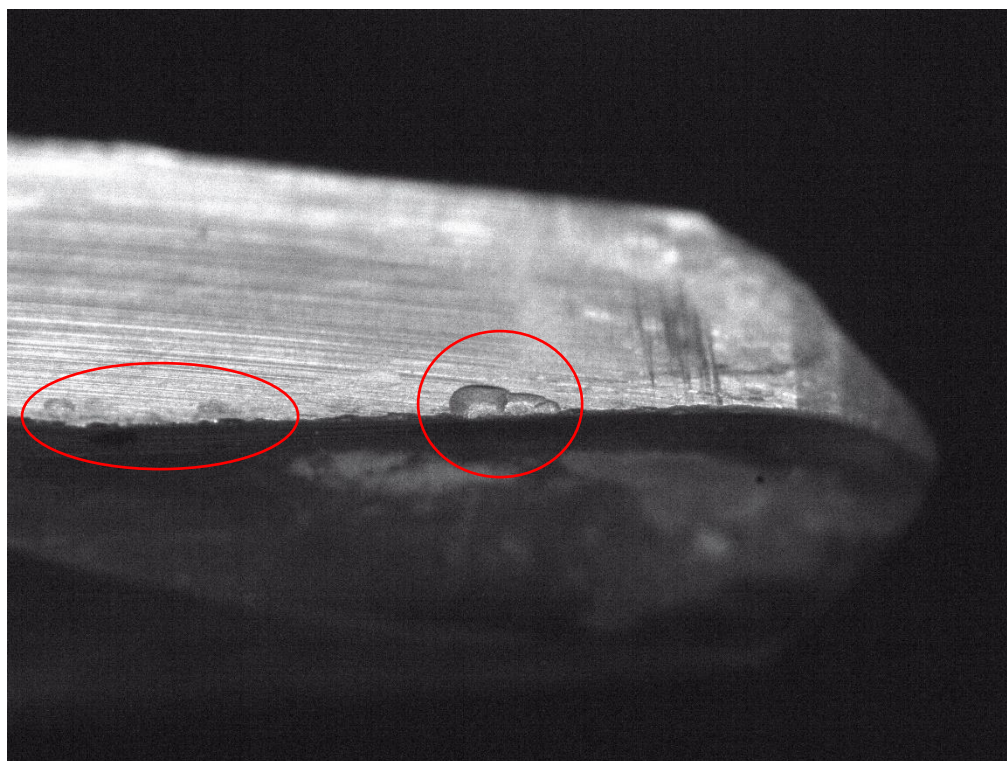


**Slika 36** Trošenje stražnje površine alata 1- NANO PRO

Na slikama 30 i 31 nalaze se snimke reznog alata NANO PRO na kojima je vidljivo zaobljenje rezne oštrice alata i minimalno trošenje stražnje površine alata.



Slika 37 Zaobljenje rezne oštrice 1- komercijalni alat

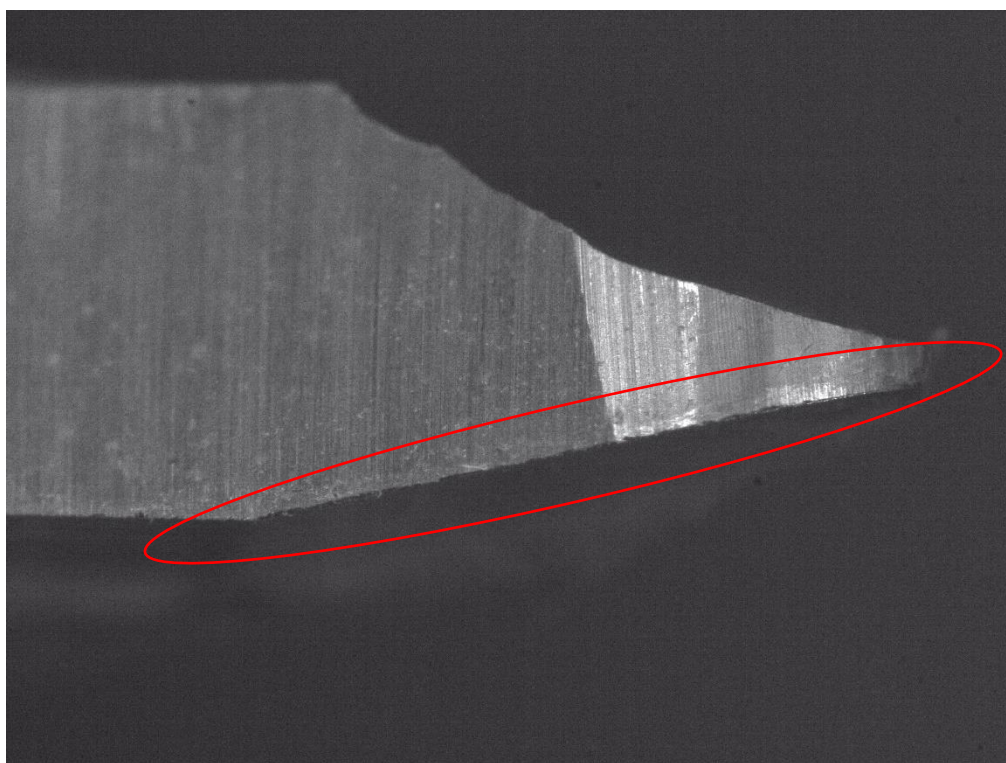


Slika 38 Lom rezne oštrice komercijalnog alata

Na slikama 32 i 33 nalazi se ista rezna oštrica, ali na alatu komercijalnog talijanskog proizvođača. Vidljivo je zaobljenje rezne oštrice kao i kod alata NANO PRO, ali je oštećenje na stražnjoj površini alata značajnije kao i oštećenje rezne oštrice.

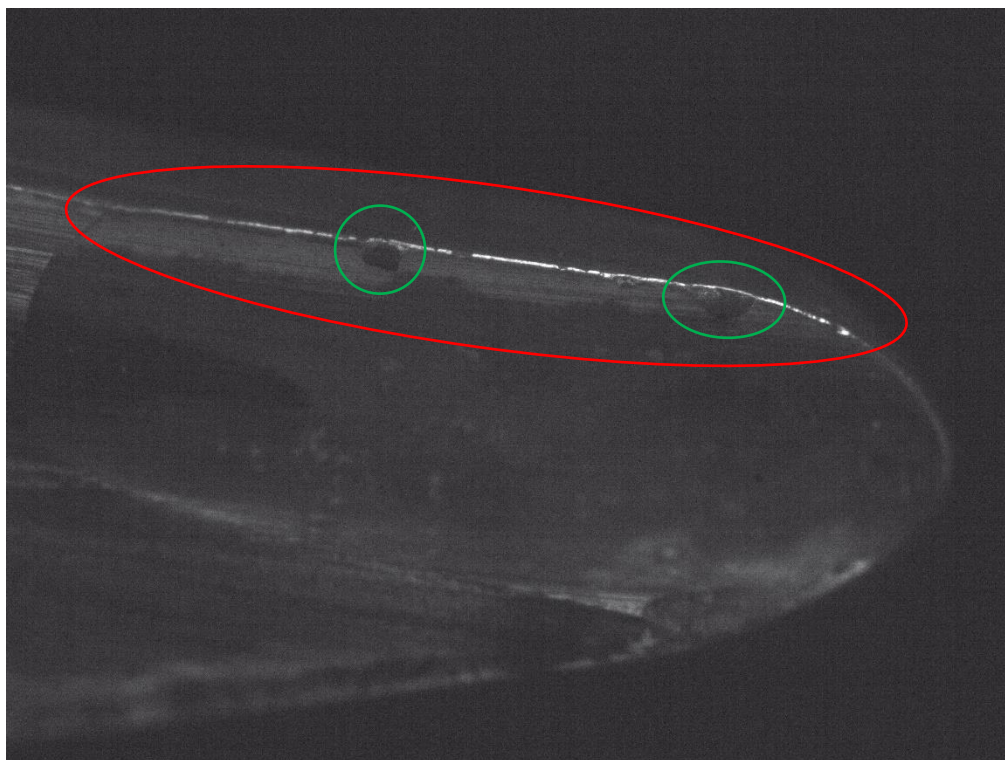


**Slika 39** Zaobljenje rezne oštrice 2 - NANO PRO

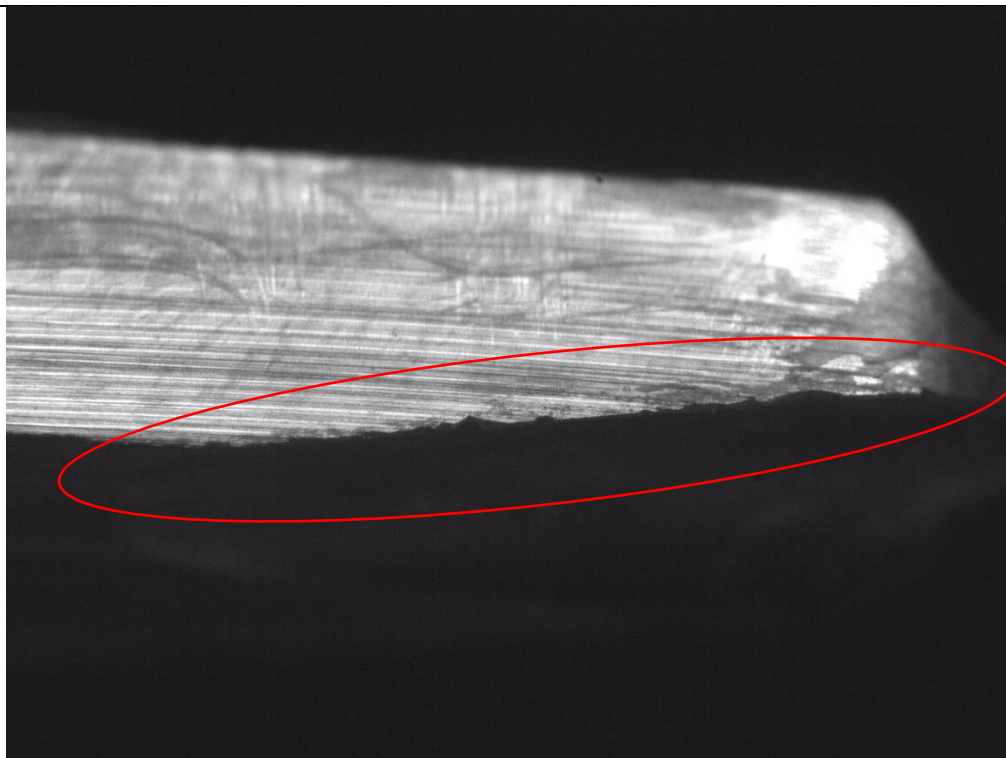


**Slika 40** Stražnja površina oštrice 2- NANO PRO- nema značajnijih oštećenja

Na slikama 34 i 35 nalazi se druga rezna oštrica alata NANO PRO. Kao i na prvoj, vidljivo je oštećenje u obliku zaobljenja rezne oštrice, dok na stražnjoj površini alata nema značajnijih oštećenja.



**Slika 41** Zaobljenje rezne oštrice 2– komercijali alat



**Slika 42** Krzanje rezne oštrice 2- komercijalni alat

Na slikama 36 i 37 nalazi se druga rezna oštrica komercijalnog alata. Zaobljenje rezne oštrice prisutno je kao i na prvoj reznoj oštrici ovog alata. Na snimci stražnje površine alata vidljivo je izraženo krzanje rezne oštrice alata.

#### **8.2.4. Rezultati istraživanja**

Nakon provedenog snimanja alata pomoću kamere može se zaključiti kako na alatima nema značajnijih pojavnih oblika trošenja. Kod alata A1, komercijalnog alata talijanskog proizvođača, vidljivo je trošenje u vidu zaobljenja rezne oštrice alata kao i krzanje rezne oštrice alata. Kod alata A2, alata iz projekta NANO PRO, vidi se nastajanje zaobljenja rezne oštrice uslijed trošenja, ali se ne može kvantificirati zbog malih vrijednosti. Ukoliko bi se htjelo vidjeti značajnije trošenje reznih alata i napraviti detaljnija usporedba, bilo bi potrebno napraviti ispitivanje u trajanju od barem 100 sati sa svakim reznim alatom.

## **9. ZAKLJUČAK**

Istraživanje je provedeno s ciljem ispitivanja trošenja novog alata NANO PRO. Rezna oštrica od nanostrukturiranog tvrdog metala pokazala se boljom u odnosu na komercijalni alat talijanskog proizvođača. Zbog svojeg sastava, baznog praha volfram karbida (WC) i kobaltnog veziva (Co) s dodatkom inhibitora rasta zrna koji omogućava zadržavanje sitnozrnate strukture, ima bolja mehanička svojstva. To su u prvom redu veća tvrdoća, čvrstoća i otpornost na trošenje. Alat NANO PRO pokazao se manje istrošen kod pojavnog oblika trošenja zaobljenje rezne oštrice alata u odnosu na komercijalni alat. Za razliku od NANO PRO, na komercijalnom alatu pronađeni su značajniji znakovi krzanja rezne oštrice. Iako su vidljive, pojave poput zaobljenja oštrice alata na NANO PRO nisu se mogle kvalitetno kvantificirati. Za detaljniju i opsežniju analizu potrebno je povećati trajanje samog ispitivanja. Ispitivanje bi bilo dobro provesti s barem dva alata od svakog proizvođača te povećanim brojem alata s kojima se NANO PRO uspoređuje, a sve u svrhu povećanja točnosti ispitivanja. Također u budućim ispitivanjima bilo bi poželjno koristiti senzore za indirektni nadzor trošenja reznih alata kao što su senzori sila, senzori akustične emisije i vibracija te snimanje struja pogonskih motora. Nanostrukturirani tvrdi metali svakako će u budućnosti preuzeti glavnu ulogu kao materijal reznog dijela alata za obradu odvajanjem čestica kako kamena, tako i ostalih materijala.

---

## 10. LITERATURA

- [1] <https://www.group-isys.com/news/do-you-know-the-historical-story-of-machine-tools/>, pristup veljača 2023.
- [2] Udiljak T., Klaić M.: Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem, predavanja
- [3] [https://en.wikisource.org/wiki/Practical\\_Treatise\\_on\\_Milling\\_and\\_Milling\\_Machines](https://en.wikisource.org/wiki/Practical_Treatise_on_Milling_and_Milling_Machines), pristup veljača 2023.
- [4] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=58093>, pristup listopad 2022.
- [5] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Keopsova\\_piramida](https://hr.wikipedia.org/wiki/Keopsova_piramida), pristup veljača 2023.
- [6] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Partenon>, pristup veljača 2023.
- [7] <https://bs.wikipedia.org/wiki/Koloseum>, pristup veljača 2023.
- [8] <https://putnikofer.hr/mjesta/rimski-koloseum-zanimljivosti/>, pristup veljača 2023.
- [9] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrvatska\\_arhitektura](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrvatska_arhitektura), pristup veljača 2023.
- [10] [http://repozitorij.fsb.hr/2064/1/06\\_12\\_2012\\_Diplomski\\_rad\\_Jure\\_Burnac.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/2064/1/06_12_2012_Diplomski_rad_Jure_Burnac.pdf), pristup veljača 2023.
- [11] <https://stiprodukt.hr/proizvod/valjkasto-ceono-glodalo-hss-co5-din-1880-tip-n-promat>, pristup listopad 2022.
- [12] <https://metal-kovis.hr/shop/cijena/glodalo-tm-o16-4-pera-ttk-ce-4160c>, pristup prosinac 2022.
- [13] Ciglar D.: Alati i naprave, predavanja
- [14] Ciglar D.: Obradni strojevi, predavanja
- [15] Šavar.Š.: Obrada metala odvajanjem čestica, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [16] <https://metal-kovis.hr/shop/cijena/glodalica-prvomajska-ug-1-s-priborom-web-3627>, pristup listopad 2022.
- [17] <https://www.simplex.hr/hr/portal-milling>, pristup prosinac 2023.
- [18] <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A7882/datastream/PDF/view>, pristup siječanj 2023.
- [19] <https://www.directindustry.com/prod/comi-spa/product-50365-1833052.html>
- [20] Filetin, T. ; Kovačićek F.; Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [21] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=58093>, pristup studeni 2022.
- [22] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=18332>, pristup studeni 2022.
- [23] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=23123>, pristup studeni 2022.

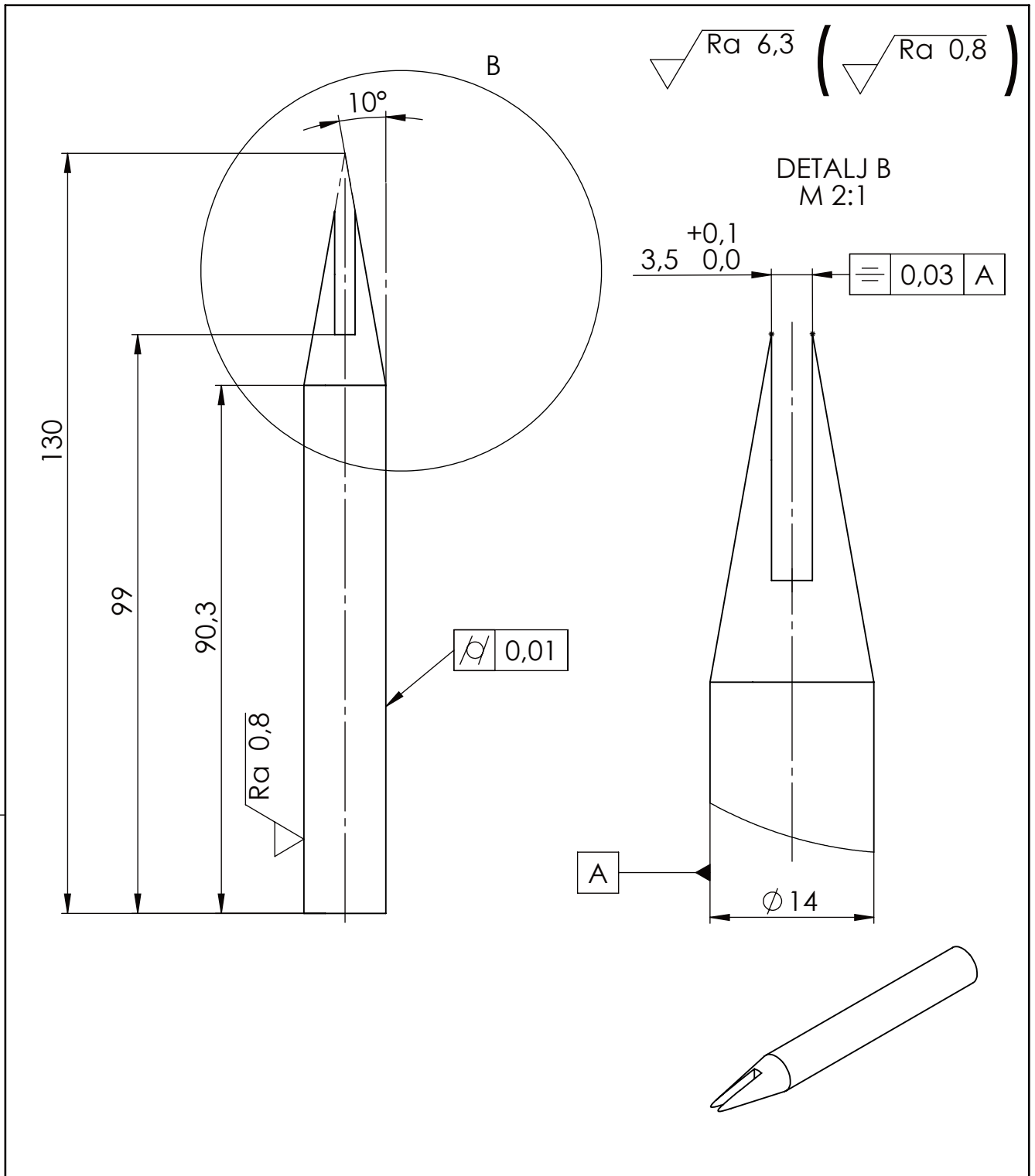


- 
- [24] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=55144>, pristup studeni 2022.
- [25] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=40377>, pristup studeni 2022.
- [26] <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=42196>, pristup studeni 2022.
- [27] Klaić. M, Konstrukcija glodaćeg obradnog centra za obradu kamena, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2012.
- [28] <https://com-adria.hr/proizvod/dlijeto-mramor-rucno-10-mm/>, pristup veljača 2023.
- [29] <https://com-adria.hr/proizvod/dlijeto-rucno-12-mm-6-zubi/>, pristup veljača 2023.
- [30] <https://com-adria.hr/proizvod/brus-granit-osawa-prof-sd2m/>, pristup veljača 2023.
- [31] <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A5806/datastream/PDF/view>, pristup siječanj 2023.
- [32] <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A4277/datastream/PDF/view>, pristup veljača 2023.
- [33] Udiljak, T. : Postupci obrade odvajanjem, pred.
- [34] <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A5911/datastream/PDF/view>, pristup siječanj 2023.

---

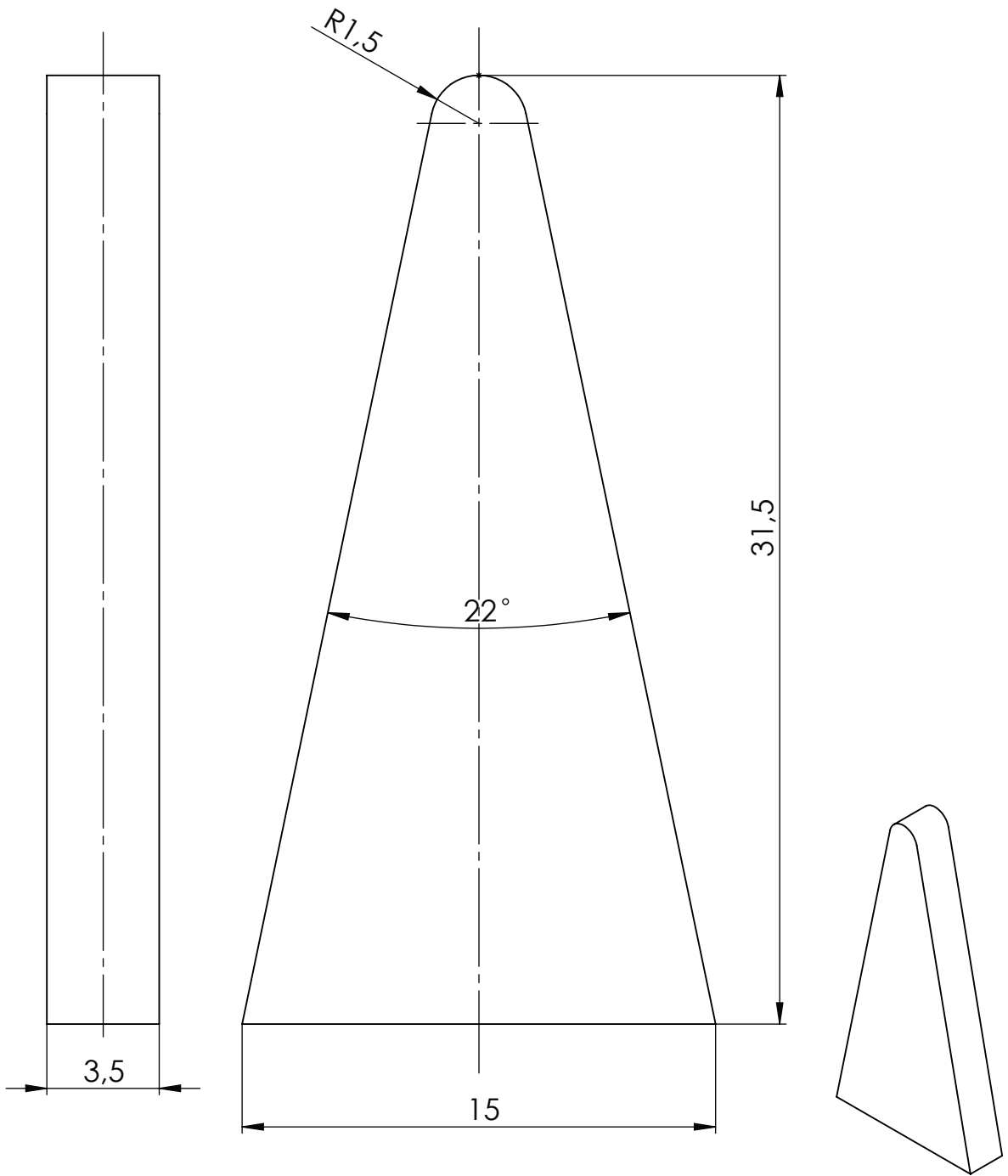
## **11. PRILOZI**


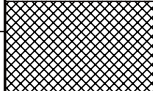
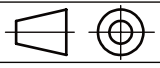
### 1. Tehnička dokumentacija

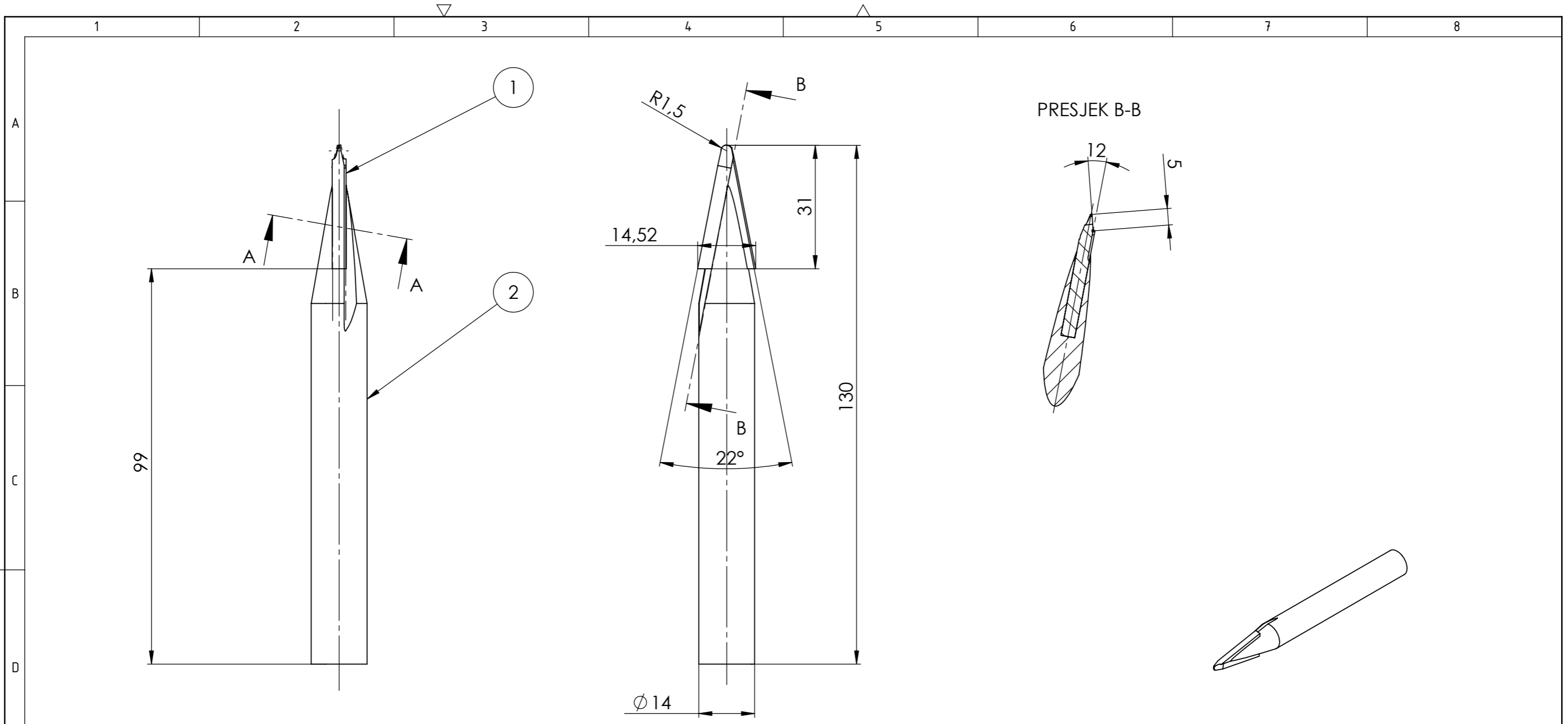


Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio				
	Crtao	02.2023.	Antonio Škrlin		
	Pregledao				
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena:				Kopija
	Materijal: Č.3990		Masa:		
			Naziv:		Pozicija:
	Mjerilo originala		DRŽAČ		2
	1:1		Crtež broj: 02-2023-02		Format: A4
					Listova: 1
					List: 1

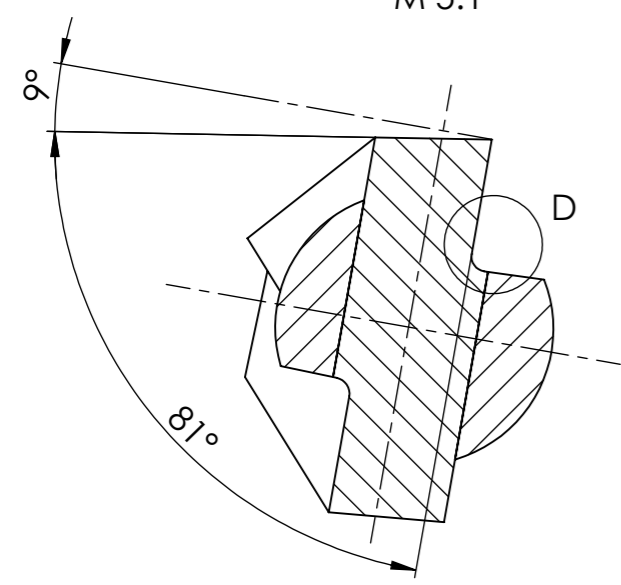
Design by CADLab



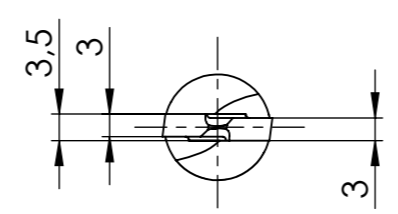
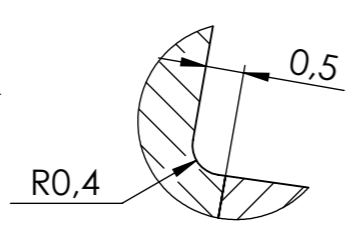
Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
	Razradio				
	Crtao	02.2023	Antonio Škrin		
	Pregledao				
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena:				Kopija
					
	Materijal: TM	Masa:			
		Naziv:			Pozicija:
	Mjerilo originala	<b>REZNA PLOČICA</b>			1
	5:1	Crtež broj: 02-2023-01			Format: A4
					Listova: 1
					List: 1



PRESJEK A-A  
M 5:1



DETALJ D  
M10:1



2	Držač	1	02-2023-02	Č.3990	Ø 14x130	
1	Rezna pločica	1	02-2023-01	TM	15x31,5	
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije Proizvođač	Masa
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis			
Projektirao						
Razradio						
Crtao	02.2023.	Antonio Škrilin				
Pregledao						
ISO - tolerancije	Objekt:	Objekt broj:				
		R. N. broj:				
	Napomena:					Kopija
	Materijal:	Masa:				
	 Mjerilo originala	Naziv:	ALAT NANO PRO		Pozicija:	Format: A3
	1:1	Crtež broj: 02-2023-00			Listova: 1	List: 1

