# Trendovi kod postupaka obrade odvajanjem čestica

**Bagarić, Dora**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:706127

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-18**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Dora Bagarić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor: Studentica:

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

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Tomi Udiljaku na strpljenju, pomoći i savjetima.

Dora Bagarić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
|---|---|
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

# ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dora Bagarić** Mat. br.: 0035202821

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trendovi kod postupaka obrade odvajanjem čestica**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Trends in machining processes**

Opis zadatka:

Postupci obrade odvajanjem čestica, posebno konvencionalni, imaju vrlo dugu tradiciju i veliku primjenu u gospodarstvu. Kako bi odgovorili zahtjevima tržišta, novih proizvoda i novih materijala, kontinuirano se usavršavaju pri čemu promjene mogu biti toliko značajne da se govori o novim postupcima obrade odvajanjem. Jedna od promjena koje su u velikoj mjeri utjecale na sve komponente obradnog sustava, pa tako i na proces obrade, je potreba obrade dijelova i/ili značajki vrlo malih dimenzija. Zbog svojih posebnosti, takve obrade se nazivaju mikro obrade. Teorijske postavke koje se primjenjuju kod makro obrada ne mogu se izravno preslikati na mikro obrade. Zbog toga se provode brojna istraživanja mikro obrada, kako za područje konvencionalnih tako i za nekonvencionalne obrade. Kako bi se digla produktivnost obrade, omogućila ili olakšala obrada, kod mikro obrada se često koriste obrade koje se nazivaju hibridne obrade ili hibridni procesi. Hibridni procesi se obično dijele u dvije skupine: procesi u kojima su svi sudjelujući procesi izravno uključeni u odvajanje materijala i hibridni procesi u kojima samo jedan proces izravno sudjeluje u odvajanju materijala, a drugi samo pomaže odvajanje materijala olakšavajući uvjete obrade odvajanjem čestica.
U radu je potrebno dati pregled trendova kod konvencionalnih i nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem čestica s posebnim osvrtom na mikro obrade i primjenu hibridnih procesa kod konvencionalnih mikro obrada.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Tomaž Udiljak

Rok predaje rada:
**1. rok:** 22. veljače 2019.
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2019.
**3. rok:** 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
**1. rok:** 25.2. - 1.3. 2019.
**2. rok (izvanredni):** 2.7. 2019.
**3. rok:** 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

# SADRŽAJ

SADRŽAJ ..... I
POPIS SLIKA ..... III
POPIS OZNAKA I KRATICA ..... VIII
SAŽETAK ..... X
SUMMARY ..... XI
1. UVOD ..... 1
1.1. Industrija 4.0 ..... 1
1.1.1. Virtualno – fizički sustavi (Cyber – physical systems) ..... 2
1.2. Materijali obradaka i alata ..... 2
1.3. Hibridni stroj – obrada odvajanjem čestica i aditivna tehnologija ..... 3
2. KONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM ..... 6
2.1. Visokobrzinska obrada, VBO (High speed cutting, HSC) ..... 6
2.2. Obrada uz minimalnu količinu sredstva za hlađenje i podmazivanje (Minimum quantity cooling lubrication, MQCL) ..... 14
2.3. Kriogena obrada (Cryogenic machining) ..... 19
2.4. Tvrda obrada (Hard machining) ..... 19
2.5. Tokarenje „prime“ (PrimeTurning™) ..... 23
3. NEKONVENCIONALNI (NAPREDNI) POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM ..... 25
3.1. Pojedinačni nekonvencionalni postupci (Single-action nontraditional machining) ..... 25
3.1.1. Uvod ..... 25
3.1.2. Mehanički postupci ..... 26
3.1.3. Toplinski postupci ..... 27
3.1.4. Elektrokemijski postupci ..... 31
3.1.5. Kemijski postupci ..... 32
3.2. Hibridni postupci (Hybrid machining) ..... 33
3.2.1. Uvod ..... 33
3.2.2. Definicija i karakteristike hibridnih postupaka ..... 34
3.2.3. Miješani hibridni procesi (Mixed or combined hybrid processes) ..... 34
3.2.4. Potpomognuti hibridni procesi (Assisted hybrid processes) ..... 38
4. MIKRO OBRADE ODVAJANJEM ..... 51

4.1. Uvod ... 51
4.2. Konvencionalne mikro obrade ... 51
4.2.1. Mikro tokarenje ... 55
4.2.2. Mikro glodanje ... 56
4.2.3. Mikro bušenje ... 57
4.2.4. Mikro brušenje ... 58
4.3. Nekonvencionalne (napredne) mikro obrade ... 59
4.3.1. Pojedinačne nekonvencionalne mikro obrade ... 59
4.3.2. Hibridne mikro obrade ... 60
ZAKLJUČAK ... 66
LITERATURA ... 67

# POPIS SLIKA

Slika 1 Koraci glodanja i aditivnog postupka prilikom izrade cijevi rashladnog sustava [9] ..... 4
Slika 2 Prikaz efekta stepenica (lijevo); učinak glodanja (desno) [9] ..... 5
Slika 3 Dijagram pokazuje za koje se područje brzina smatra da pripada visokobrzinskom području i pokazuje odnose tih područja za različite vrste materijala [7] ..... 6
Slika 4 Dijagram $\vartheta$ - $v_c$ (ovisnost temperature o brzini rezanja različitih materijala) [7] .... 7
Slika 5 Dijagram površinska hrapavost, Ra – brzina rezanja, $v_c$ [12] ..... 9
Slika 6 Dijagram trošenja na stražnjoj površini alata u odnosu na brzinu rezanja [12] .... 10
Slika 7 Izgled trošenja alata – kratersko trošenje ($v_C$ = 60 m/min) [12] ..... 10
Slika 8 Izgled trošenja alata – kratersko trošenje ($v_C$ = 90 m/min) [12] ..... 11
Slika 9 Izgled trošenja alata – kratersko trošenje ($v_C$ = 190 m/min) [12] ..... 11
Slika 10 Izgled trošenja alata – zarezno trošenje ($v_C$ = 255 m/min) [12] ..... 11
Slika 11 Trošenje prednje i stražnje površine alata od CBN-a ($v_C$ = 500 m/min, dužina obrade: 400 m) [11] ..... 12
Slika 12 Shematski prikaz: (lijevo) poravnanje stražnje površine alata bez teksture i otežan dovod SHIP-a; (desno) utjecaj mikro utora na dovod SHIP-a do zone rezanja [11] ..... 12
Slika 13 Izvedba mikro utora (teksture) na stražnjoj površini alata [11] ..... 12
Slika 14 Trošenje alata, VB u ovisnosti o dužini obrade (za alat s i bez utora; s i bez SHIP-a; $v_C$ = 500 m/min) [11] ..... 13
Slika 15 Stražnja površina (dužina obrade: 100 m): lijevo – alata bez teksture, desno – alata s mikro utorima ($v_C$ = 500 m/min) [11] ..... 14
Slika 16 Stražnja površina (dužina obrade: 400 m): lijevo – alata bez teksture, desno – alata s mikro utorima ($v_C$ = 500 m/min) [11] ..... 14
Slika 17 Razina adhezijskog djelovanja na prednju površinu alata u ovisnosti o smjeru pružanja mikro utora na prednjoj površini alata (dužina obrade: 1800 m) [16] .... 16
Slika 18 Volumen nastalog adhezijskog sloja na alatu: bez površinske teksture, s mikro udubljenjima (DT-03) i s mikro utorima (tri različita smjera pružanja – MS – 00,45,90) [16] ..... 16

Slika 19 Prikaz prednje površine alata bez teksture: prije obrade (lijevo), nakon obrade (desno) (dužina obrade: 1800 m) [16] ..... 17
Slika 20 Prikaz prednje površine alata s mikro udubljenjima: prije obrade (lijevo), nakon obrade (desno) (dužina obrade: 1800 m) ..... 17
Slika 21 Prikaz načina izvođenja eksperimenta [16] ..... 18
Slika 22 Dijagram sila – položaj alata (kut rotacije) (dužina obrade: 180 m i 1800 m): lijevo – alat bez teksture, desno: alat s udubljenjima na prednjoj površini [16] ... 19
Slika 23 Izvedba wiper (1. red) i obične (2. red) pločice te usporedba postizivih rezultata wiper pločicom (1. red) [20] ..... 20
Slika 24 Parametri korišteni prilikom istraživanja [20] ..... 21
Slika 25 Rezultati mjerenja površinske hrapavosti za pojedinu kombinaciju parametara [20] ..... 22
Slika 26 Dijagramski prikaz ovisnosti hrapavosti o parametrima s najvećim utjecajem [20] ..... 23
Slika 27 Površinska hrapavost nakon obrade običnom i wiper pločicom te brušenjem [20] ..... 23
Slika 28 A tip rezne pločice [21] ..... 24
Slika 29 B tip rezne pločice [21] ..... 24
Slika 30 Delaminacija kompozita prilikom obrade abrazivnim vodenim mlazom [23] ..... 27
Slika 31 Primjer valovitog traga na površini obrade vodenim mlazom [25] ..... 27
Slika 32 Elektroerozijski postupak [22] ..... 28
Slika 33 Laserska obrada [18] ..... 29
Slika 34 Različite teksture površine Ti6Al4V dobivene laserskom obradom [23] ..... 29
Slika 35 Postupak obrade snopom elektrona [18] ..... 30
Slika 36 Nano pore – dobivene različitim vremenom djelovanja elektronskog snopa [26] 31
Slika 37 Prikaz elektrokemijske obrade (ECM) [25] ..... 32
Slika 38 Prikaz postupka i koraka kemijske obrade [18] ..... 33
Slika 39 Tokarenje potpomognuto laserom [28] ..... 33
Slika 40 Prikaz elektrokemijskog brušenja [27] ..... 36
Slika 41 Prikaz elektroerozijskog brušenja [27] ..... 37
Slika 42 Prikaz kombinacije elektroerozijskog i elektrokemijskog postupka [27] ..... 37
Slika 43 Djelovanje vibracije prilikom tokarenja u: radijalnom smjeru (lijevo), smjeru glavne brzine (sredina) i posmične brzine (desno) [8] ..... 38

Slika 44 Površinske strukture dobivene tokarenjem uz vibraciju: u smjeru glavne brzine rezanja (1. slikovni stupac), u radijalnom smjeru (2. slikovni stupac) i u smjeru posmičnog gibanja (3. slikovni stupac) [8] ..... 39
Slika 45 Neravnine uzrokovane tokarenjem [20] ..... 40
Slika 46 Dijagram: Ra (hrapavost) – f (posmak), za dva slučaja frekvencija vibracije (tokarenje potpomognuto vibracijom) [8] ..... 41
Slika 47 lijevo: konvencionalno tokarenje i desno: tokarenje potpomognuto vibracijom [8] ..... 42
Slika 48 Oblici odvojene čestice [8] ..... 42
Slika 49 Sustav za tokarenje potpomognuto vibracijom (lijevo), postizive hrapavosti (desno) [8] ..... 43
Slika 50 Primjena vibracije: a) na obratku, b) na alatu [8] ..... 43
Slika 51 Geometrija rezne oštrice brusnog zrna [31] ..... 45
Slika 52 lijevo: negativni utjecaj vibracija na površinu obratka od $Al_2O_3$ (RUAG postupak) i desno: tekstura površine [8] ..... 45
Slika 53 Alat za honanje potpomognuto vibracijom [8] ..... 46
Slika 54 Elektroerozijska obrada potpomognuta vibracijom [8] ..... 47
Slika 55 lijevo: promjena temperature u obratku i desno: dijagram čvrstoća – temperatura [8] ..... 48
Slika 56 Utjecaj dovoda sredstva pod visokim tlakom na oblik odvojene čestice [8] ..... 50
Slika 57 Slučaj kada je, u odnosu na minimalnu debljinu nedeformirane čestice, debljina nedeformirane čestice: a) manja, b) približno jednaka, c) veća [33] ..... 52
Slika 58 Glodalo: a) s dva žlijeba, b) s trokutastim poprečnim presjekom, c) s polukružnim poprečnim presjekom [33] ..... 54
Slika 59 Usporedba: a) neprevučeni alat (WC), b) alat s PCD prevlakom [33] ..... 54
Slika 60 Prikaz: a) obradak dobiven profilnim mikro tokarenjem, b) mikro osovina s dva različita promjera [33] ..... 56
Slika 61 Prikaz: a) mikro glodala promjera 300 μm, b) SEM slika dna alata, c) oštrica alata s polumjerom zaobljenja [33] ..... 57
Slika 62 Prikaz mikro svrdla [33] ..... 58
Slika 63 Prikaz mikro brusnog diska (Φ 45 μm) i zrna (veličina: 1 – 3 μm) [33] ..... 59
Slika 64 μECM i mikro brušenje [29] ..... 60
Slika 65 3D mikrostrukture u staklu dobivene μECDM obradom [29] ..... 61

Slika 66 Postupak elektroerozijske obrade potpomognute vibracijom [27] ..... 63
Slika 67 Elementi sustava za lasersku mikro obradu potpomognutu vodom [29] ..... 65
Slika 68 Prikaz μEDM obrade potpomognute ugljičnim nano vlaknima [29] ..... 65

# POPIS TABLICA

Tablica 1 Rezultati obrade pločicom za PrimeTurning™ i uobičajenom pločicom [21]..... 24

# POPIS OZNAKA I KRATICA

| **Oznaka** | **Jedinica** | **Opis** |
|---|---|---|
| IoT | | Internet of Things |
| 3D | | trodimenzionalan |
| CBN | | kubični nitrid bora (cubic boron nitride) |
| PCD | | polikristalični dijamant (polycrystalline diamond) |
| CIRP | | Collège International pour la Recherche en Productique |
| VBO | | visokobrzinska obrada |
| HSC | | high speed cutting |
| f | mm | posmak |
| n | 1/min | frekvencija vrtnje |
| $v_c$ | m/min | glavna brzina rezanja (brzina rezanja) |
| $a_p$ | mm | dubina rezanja |
| Ra | μm | srednje aritmetičko odstupanje |
| SEM | | scanning electron microscope |
| SHIP | | sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje |
| MQCL | | minimum quantity cooling lubrication |
| MQL | | minimum quantity lubrication |
| MQC | | minimum quantity cooling |
| $F_R$ | N | rezultantna sila rezanja |
| $\varphi_s$ | ° | kut zahvata glodala |
| $F_c$ | N | glavna sila rezanja |
| $F_f$ | N | posmična sila rezanja |
| $r_\varepsilon$ | mm | polumjer vrha alata |
| $f_n$ | mm/okr | posmak glodala po okretaju |
| WJM | | water jet machining |
| AWJM | | abrasive water jet machining |
| EDM | | electric discharge machining |
| DC | | direct current |
| HA | | hydroxyapatite |

| | | |
|---|---|---|
| c | m/s | brzina svjetlosti |
| DNK | | deoksiribonukleinska kiselina |
| RNK | | ribonukleinska kiselina |
| ECM | | electrochemical machining |
| MEMS | | mikro-elektro-mehanički sustav |
| ZUT | | zona utjecaja topline |
| ECDM | | electrochemical discharge machining |
| $v_f$ | m/min | posmična brzina |
| $v_{c,res}$ | m/min | rezultantna glavna brzina rezanja |
| A | μm | amplituda vibracije |
| t | min | vrijeme |
| ω | kHz | kutna brzina |
| $f_{us}$ | kHz | frekvencija vibracije |
| $a_{p,\ res}$ | mm | rezultantna dubina rezanja |
| $d_c$ | m | dimenzija površinske strukture u smjeru promjera |
| $f_{res}$ | mm/okr | rezultantni posmak |
| CFRP | | carbon fibre-reinforced polymer composite |
| RUAG | | Rotary Ultrasonic Assisted Grinding |
| CNC | | computer numerical control |
| h | mm | debljina nedeformirane čestice |
| $r_e$ | | polumjer zaobljenja rezne oštrice |
| $f_z$ | mm/zubu | posmak po zubu |
| FEM | | finite element method |
| μEDM | | micro electric discharge machining |
| μECDM | | micro electrochemical discharge machining |

# SAŽETAK

U završnom radu se proučavaju trendovi kod postupaka obrade odvajanjem čestica. Rad je podijeljen na četiri dijela. U prvom se posvetilo promjenama koje se događaju u proizvodnji. Nakon toga slijede predstavljanja novijih postupaka kojima se nastoji zadovoljiti različite zahtjeve proizvodnje. U drugom dijelu su opisani konvencionalni postupci, njihovi principi rada te istraživanja i primjena. U trećem dijelu se radi o nekonvencionalnim ili naprednim postupcima, a u 4., ujedno i posljednjem dijelu, se opisuju konvencionalne i nekonvencionalne mikro obrade. Mikro obrade su jedan od zahtjeva koji se postavlja pred suvremenu proizvodnju i predstavljaju izazov za primjenu jer ih se ne može shvaćati prema istim principima kao makro obrade. Zbog toga se također predstavlja i neke od prepreka i fizikalnih pojava koje bi trebalo pobliže proučiti kako bi se uspješno savladale.

Ključne riječi: promjena, proizvodnja, konvencionalna obrada odvajanjem, nekonvencionalna obrada odvajanjem, mikro obrada odvajanjem

## SUMMARY

The undergraduate thesis examines the trends in machining processes. The thesis is divided into four parts. The first is dedicated to the changes underway in production. Furthermore, the newer trends developed to satisfy the various demands of manufacturing are presented. The second part deals with traditional processes, their work principles, research on the subject and applications. The topic of the third is nontraditional or advanced processes, and both traditional and nontraditional micro processes are described in the fourth and also the last part. Micro processes are one of the requirements for modern manufacturing and they pose a challenge because they don't follow the same principles as macro processes. Therefore, some of the obstacles and physical phenomena, that need further investigation to be successfully overcame, will also be presented.

Key words: change, manufacturing, traditional machining processes, nontraditional machining processes, micro machining processes

# 1. UVOD

Tradicionalan način proizvodnje kojim se na tržište plasiraju proizvodi proizvedeni u masovnim količinama, a zatim kupci među njima pronalaze onaj koji je najbliži željenom, idealnom proizvodu, se u današnje vrijeme često opisuje kao zastario, neodrživ i neisplativ. Kupci zahtijevaju personalizirane proizvode i proizvode prilagođene njima te žele sudjelovati u procesu stvaranja ideje tog proizvoda. Stoga se može reći kako je granica između kupca i tvorca, prilično „mutna“, odnosno nije jasno definirana. Iz toga je i nastao pojam „prosumer“ kao spoj riječi „producer“ (proizvođač) i „consumer“ (potrošač). Sudjelovanje u stvaranju ideje proizvoda je utemeljeno na digitalnoj tehnologiji, a naročito se ističe internet koji je tu mogućnost približio velikom broju korisnika. U takvim uvjetima se sposobnost velikoserijske proizvodnje ograničenog broja proizvoda smatra nedostatkom te se manjim i agilnijim poduzećima otvaraju vrata tržišta. [1]

Ako se proizvodnja promatra kao sam proces stvaranja proizvoda iz sirovog materijala, onda se pred nju postavljaju zahtjevi kao što su [2]:

- veća produktivnost
- kraće vrijeme obrade
- veće iskorištenje alatnih strojeva
- povećanje kvalitete obrade
- očuvanje okoliša
- novi, teškoobradivi materijali obradaka
- minijaturizacija, tj. obrada mezo i mikro dijelova
- rastuća složenost geometrije

U sljedećim poglavljima detaljnije će se opisati neke od promjena u proizvodnji.

## 1.1. Industrija 4.0

Industrija 4.0 označava napredak proizvodnje od samo automatizirane prema inteligentnoj i prema proizvodnji u kojoj su fizički i virtualni svijet povezani. Povezanost s virtualnim omogućena je razvojem senzora, mreža, računalnih oblaka te se ostvaruje opremanjem strojeva senzorima, aktuatorima i potrebnom informatičkom opremom za obradu podataka. Taj koncept u kojem su, za slučaj proizvodnje, strojevi i ostali elementi proizvodnog sustava (npr. logistika), povezani na tzv. oblak ili računalni oblak (cloud ili cloud computing) te mogu

međusobno izmjenjivati informacije odnosno komunicirati, naziva se internet stvari (Internet of Things, IoT). [3]

- tvrtka Sandvik Coromant (Gimo, Švedska) je od strane Svjetskog ekonomskog foruma, 10. siječnja 2019. proglašena jednom od „lighthouse“ tvrtki, odnosno tvrtki vodilja za koje je ustanovljeno kako su uspješno primijenile i integrirale tehnologije koje karakteriziraju industriju 4.0. Te tvrtke su pristale podijeliti svoje vrijedno znanje s drugima i služe kao primjer tvrtkama koje imaju poteškoća s primjenom. Takva inicijativa je vrlo bitna s obzirom na to da je forum također ustanovio kako 70% poduzeća koja su uložila u razvoj, npr. „Big Data“ analize, umjetne inteligencije ili 3D printanja, nisu uspjela proći pilot fazu. [4]

Slijedi opis sustava koji predstavlja vitalni dio industrije 4.0 i suočava se s nezaobilaznim poteškoćama.

### *1.1.1. Virtualno – fizički sustavi (Cyber – physical systems)*

U virtualno – fizičkim sustavima prirodni i umjetni (stvoreni od strane čovjeka) sustavi (fizički), surađuju s računskim, komunikacijskim i kontrolnim sustavima (virtualno). Dakle može se reći kako se temelje na konceptu interneta stvari, a sljedeće što će se opisati je daljnja uloga sustava u sklopu industrije 4.0. Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, senzori se sve više razvijaju, a posljedica toga je njihova sve šira upotreba koja rezultira generiranjem preplavljujuće količine podataka. Takav veliki broj podataka naziva se „Big Data“, a kako bi se ipak iz njih dobile točne i pouzdane informacije, potreban je sistematičan pristup prikupljanju, upravljanju i analiziranju tih podataka. Takav pristup ima virtualno – fizički sustav koji razvijenim metodama i načinom rada ujedno omogućava autonomnost, samosvjesnost i samoupravljivost industrijskih strojeva. Taj „pametan“ način proizvodnje je jedan od glavnih karakteristika industrije 4.0. [5]

Prikupljanjem i analiziranjem podataka može se vršiti nadzor rada strojeva, predvidjeti potrebna održavanja i moglo bi se, na temelju znanja stvorenog iz informacija o prethodnim obradama, predvidjeti potrebne parametre i ostale uvjete obrade kako bi se već s prvim izratkom postigao dobar, točan proizvod.

## 1.2. Materijali obradaka i alata

Krute tvari gustoće koja bi se mogla usporediti s gustoćom zraka, neobične legure, izuzetno čvrsti i u isto vrijeme lagani kompoziti, materijali koji „pamte“ svoj oblik, koji su samo-popravljivi ili reagiraju na svjetlost ili zvuk, teškoobradivi materijali (titanove legure, legure

nikla) – to su sve materijali obradaka s novim svojstvima. [6] Obrada takvih zahtjevnih materijala je u puno slučajeva ostvariva hibridnim obradama o kojima će se pričati u 3.2. Hibridni postupci (Hybrid machining).

Materijali koji se koriste za izradu reznih alata su: brzorezni čelici, prevučeni brzorezni čelici, tvrdi metali, prevučeni tvrdi metali, cermet, keramika, kubični nitrid bora (CBN) i polikristalični dijamant (PCD). Alati od CBN-a, koji se smatra drugim najtvrđim materijalom, i dijamanta, koji je na prvom mjestu, nužni su kako bi obrada teškoobradivih materijala reznim alatom s oštricom uopće bila moguća. Primjena prevlaka je također vrlo raširena – skoro 4/5 pločica korištenih za obradu odvajanjem je prevučena. Razlozi popularnosti prevlaka su povećanje postojanosti alata i mogućnost primjene viših brzina rezanja, odnosno povećana produktivnost obrade. Primjeri prevlaka su: TiC, TiN, TiCN, CrN, $Al_2O_3$. [7]

Očekuje se kako će se razvitkom na području materijala i računala omogućiti razvijanje novih materijala pomoću simulacija. Time će se uštedjeti novac i vrijeme jer tvrtke neće morati provoditi veliki broj analiza na materijalima. [6]

### 1.3. Hibridni stroj – obrada odvajanjem čestica i aditivna tehnologija

Važno je napomenuti sljedeće – u poglavlju 3.2.2. Definicija i karakteristike hibridnih postupaka, dana je definicija hibridnih proizvodnih postupaka, osmišljena od strane CIRP[1] – ove suradničke radne grupe za hibridne postupke, i ona glasi:

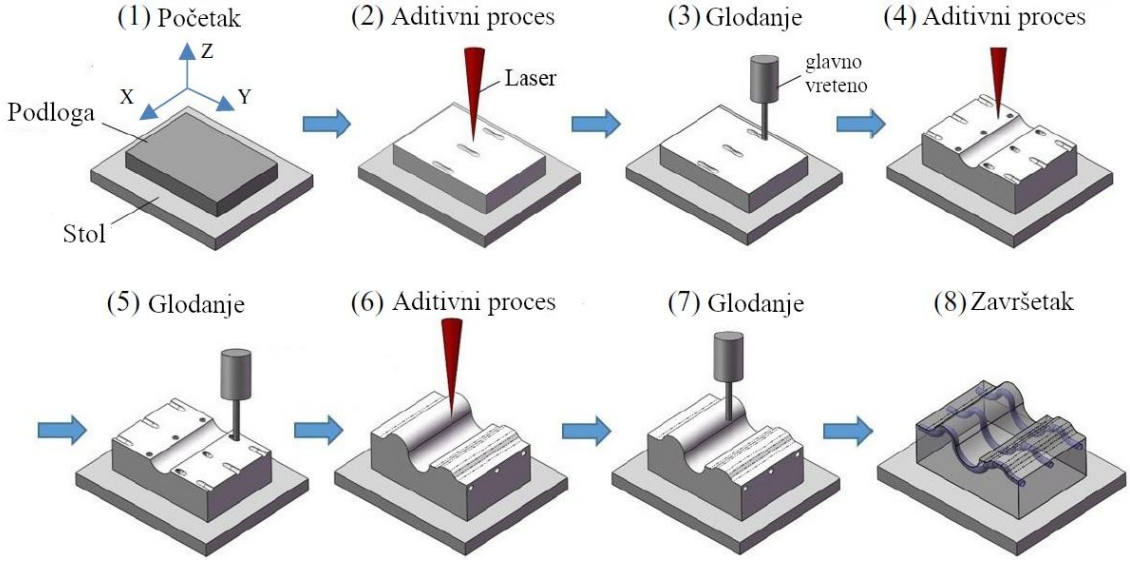
„Hibridni proizvodni postupci se temelje na simultanoj i kontroliranoj interakciji mehanizama obrade i/ili izvora energije/alata koja ima značajan utjecaj na značajke postupka.“.

„Simultana i kontrolirana interakcija“ odnosi se na to da bi sve obrade/izvori energije trebali djelovati u približno istoj zoni obrade i u približno isto vrijeme. [8] Kod opisa obrade glodanja i selektivnog laserskog taljenja, danog u sljedećem odlomku, može se zamijetiti kako se aditivni proces i proces odvajanja odvijaju slijedno, jedan za drugim što ne odgovara hibridnom procesu čije bi se komponente, prema definiciji, trebale odvijati istovremeno ili približno istovremeno. Iz tog razloga se radi razlika između hibridnog procesa i hibridnog stroja. Hibridni stroj se može definirati kao: „stroj koji ima integrirane različite procese unutar jedne proizvodne platforme“. [8]

Jedni od procesa koji se mogu koristiti kod hibridnih strojeva su aditivni procesi. Oni su razvijeni za industrijsku primjenu jer imaju mogućnost jednostavnog stvaranja dijelova od

[1] CIRP - Collège International pour la Recherche en Productique (*eng.* The International Academy for Production Engineering)

teškoobradivih materijala i složenih geometrija. Kao primjer takve geometrije proizvoda može se dati složeni rashladni sustav. Aditivni postupci kod kojih se mogu koristiti metalni materijali su: selektivno lasersko taljenje (selective laser melting), selektivno lasersko sinteriranje (selective laser sintering), izravno taloženje metala (Laser Engineered Net Shaping), taložno srašćivanje (Fused Deposition Modeling) itd. Uz metale (nehrđajući čelik, aluminij, titan, CuCr legure, ...) se još mogu primijeniti: plastika, keramika i staklo. Međutim, aditivni postupci imaju i svoje značajne nedostatke: relativno loša površinska kvaliteta, hrapavost površine i loša geometrijska i dimenzijska točnost. Stoga se aditivnoj tehnologiji pridružila obrada odvajanjem kojom se kompenzira navedene nedostatke aditivnih postupaka. Promotrit će se primjer glodanja i selektivnog laserskog taljenja (Slika 1). Izrada obratka se odvija tako što se radna podloga steže na radni stol te se na radnu podlogu nanosi sloj metalnog praha. Laserskom zrakom se prelazi preko praha uslijed čega dolazi do taljenja čestica praha i sinteriranja. Nakon sinteriranja sloja, radni stol se spušta za debljinu sloja te se ponovno nanosi novi prah i cijeli proces se ponavlja nekoliko puta. Zatim slijedi glodanje obratka. Ta dva procesa se izmjenjuju dok obradak ne bude završen. [9]



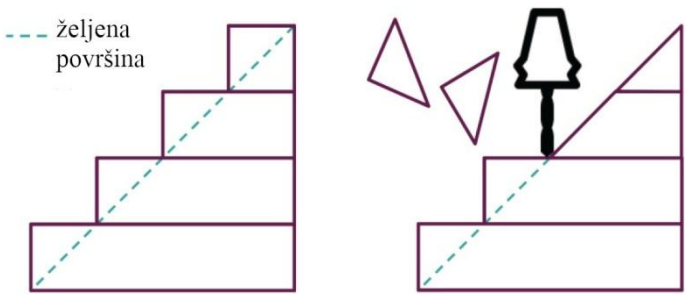

**Slika 1 Koraci glodanja i aditivnog postupka prilikom izrade cijevi rashladnog sustava [9]**

Primjenom hibridnog stroja za obradu se [9]:

- postiže manje vrijeme obrade u situaciji kada bi, samom obradom odvajanja, bilo potrebno odvojiti veliki volumen materijala jer se, primjenom aditivne tehnologije, može dobiti dio koji je gotovo točnog oblika (near-net-shape) (stoga je udio procesa odvajanja puno manji)
    - kod, npr. teškoobradivih materijala je vrlo bitno postizanje „near-net-shape“ dijela i manjeg udjela odvajanja čestica, jer se time postiže manje trošenje alata i manje izgubljenog materijala (u obliku odvojene čestice)
- kombiniranjem procesa omogućava dobivanje točnih dijelova od različitih materijala

Svojstva obratka, nakon obrade na hibridnom stroju, su se promatrala i tijekom istraživanja u kojem se, selektivnim laserskim taljenjem i visokobrzinskim glodanjem, iz „maraging“ čelika dobio kalup za injekcijsko prešanje s kanalima za unutarnje hlađenje. Obrada se odvijala na hibridnom stroju čije glavno vreteno ima najveći broja okretaja u iznosu od 45 000 okr/min. Radni prostor je bio vakuumiran, a zatim napunjen dušikom kako bi se spriječila oksidacija tijekom procesa. Debljina sloja je bila konstantnog iznosa od 40 μm, laserska zraka se kretala brzinom od 1400 mm/s (84 m/min), a promjer zrake je bio 0,2 mm. Obrada glodanja je slijedila nakon svakog desetog sloja. Zbog potencijalnog negativnog utjecaja, sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje nije bilo dozvoljeno koristiti. Rezultati su pokazali kako se obradom na hibridnom stroju: [9]

- javilo puno manje poroziteta u obratku u odnosu na pojedinačni aditivni proces
- postigla glatka površina obratka, za razliku od pojedinačnog selektivnog laserskog taljenja gdje je površina bila gruba i s ostacima nerastaljenog praha
- glodanjem povećava kvaliteta površine jer se uklanja, tzv. efekt stepenica (stair effect) (do kojeg dolazi zbog načina rada procesa selektivnog taljenja, gdje se dio dobiva sloj po sloj) (Slika 2)

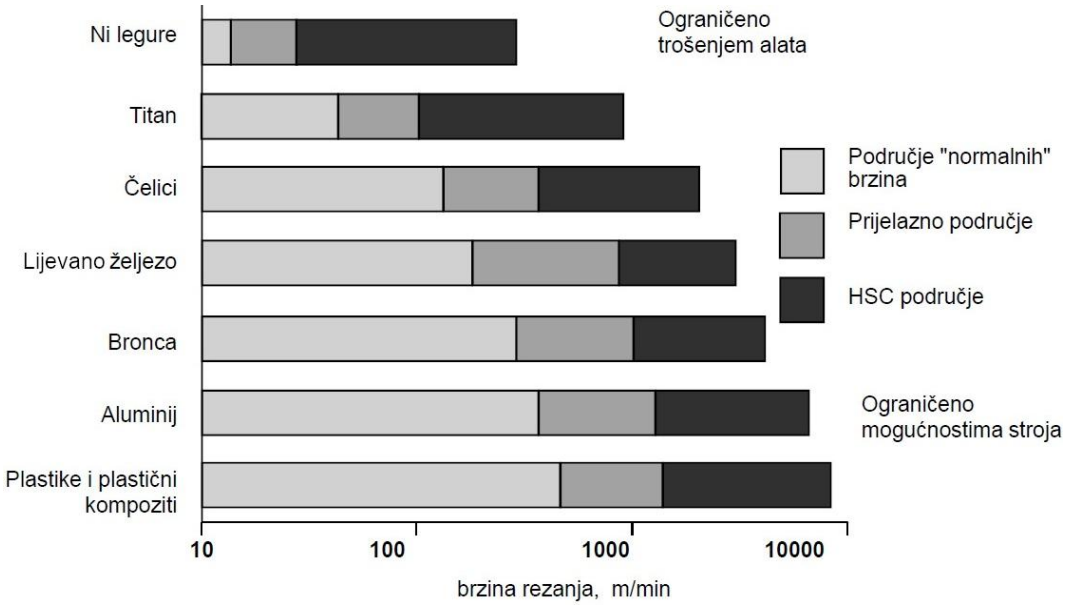



**Slika 2 Prikaz efekta stepenica (lijevo); učinak glodanja (desno) [9]**

# 2. KONVENCIONALNI POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

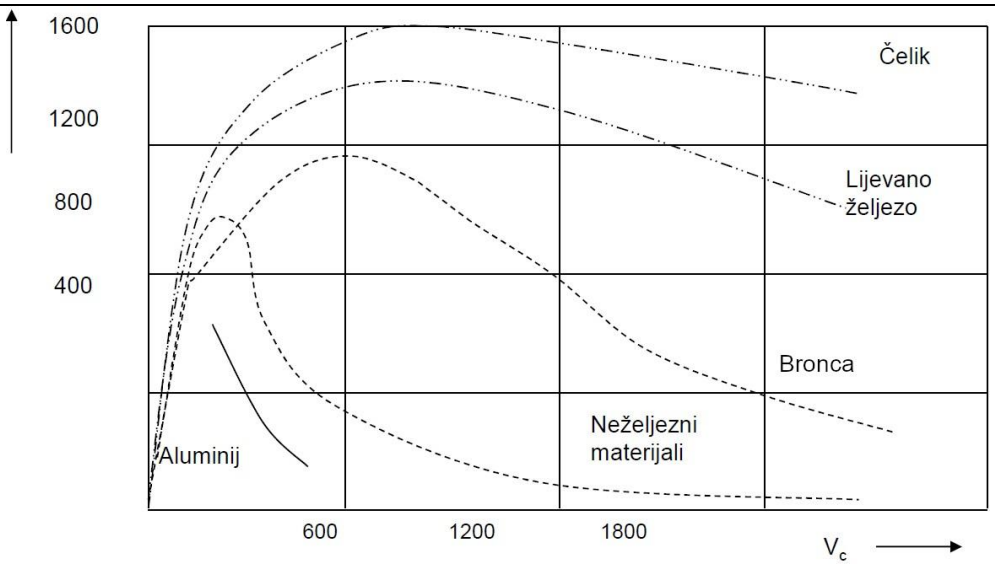
## 2.1. Visokobrzinska obrada, VBO (High speed cutting, HSC)

Kao što ime govori, radi se o obradi glavnim brzinama koje su 5 do 10 puta veće u odnosu na konvencionalne brzine, s time da se mora imati na umu da ne postoji jednoznačna, univerzalna vrijednost brzine koja određuje granicu između visokobrzinske i „normalne“ obrade. Vrijednosti brzina rezanja koje se koriste za visokobrzinske obrade strogo ovise o materijalu obratka (Slika 3). Visokobrzinske obrade se još opisuju i kao obrade na velikim frekvencijama vrtnje (n), obrada visokim posmacima (f) ili obrada velikim volumenima odvojenih čestica u jedinici vremena. [10], [7]




**Slika 3 Dijagram pokazuje za koje se područje brzina smatra da pripada visokobrzinskom području i pokazuje odnose tih područja za različite vrste materijala [7]**

Odgovore na pitanja u čemu je značaj ovakve obrade i kako se uopće određuje visokobrzinsko područje, daje otkriće dr. Carla Salomona. On je prvi, 30-ih godina 20. stoljeća, primijetio kako se, nakon određene brzine rezanja, temperatura rezanja počinje smanjivati (Slika 4). Dr. Salomon je otkriće patentirao (njemački Reichspatent br. 523594, 1931. godine), a ta brzina nakon koje dolazi do pada temperature rezanja, se uzima kao početak područja visokobrzinske obrade. [10], [7]




**Slika 4 Dijagram ϑ - $v_c$ (ovisnost temperature o brzini rezanja različitih materijala) [7]**

Značaj obrade su:

- povećanje produktivnosti
- najveći dio topline stvorene obradom odlazi s odvojenom česticom
- smanjenje sile rezanja (manje sile uzrokuju manje deformacije što omogućuje obradu tankostjenih profila)
- poboljšana kvaliteta obrađene površine (uslijed mogućih većih $v_c$)

Potencijal visokobrzinske obrade je prepoznat u Japanu početkom 1980. godine, a nedugo nakon toga i u Njemačkoj. Razlog zašto je bilo potrebno 50-ak godina kako bi se počela razvijati visokobrzinska obrada, nalazi se u tehničkim zahtjevima ili preduvjetima koje nalaže uspješna industrijska primjena takve obrade. Prije svega je potrebno obradu promatrati kao sustav koji se sastoji od alatnog stroja, alata, obratka i njihovih međusobnih sučelja. Zahtjevi se mogu dalje razmatrati prema tim komponentama. [10], [7]

Neki od zahtjeva na alatni stroj: prigoni (za glavno gibanje je potrebno koristiti motorvreteno, za posmično gibanje linearni motor), upravljački sustav (osigurati dostatnu brzinu prijenosa i obrade informacija, omogućiti čitanje i do 100 blokova koda unaprijed), postolje (od mineralnog lijeva za lake i srednje strojeve; u obliku metalne konstrukcije za teške strojeve) itd.

Zahtjevi na alat: materijal (visoka tvrdoća i na povišenim temperaturama, kemijska postojanost, žilavost), prevlake (povećanje postojanosti, mogućnost obrade višim brzinama rezanja), prihvat i balansiranje (uslijed velikog broja okretaja može doći do izlijetanja alata)

Zahtjevi na sučelja: prihvat i stezanje alata (HSK držač – stezanje iznutra pa se uslijed povećanja brzine i rasta centrifugalnih sila, alat dodatno steže), prihvat i stezanje obradaka itd.

Visokobrzinskom obradom postiže se i:

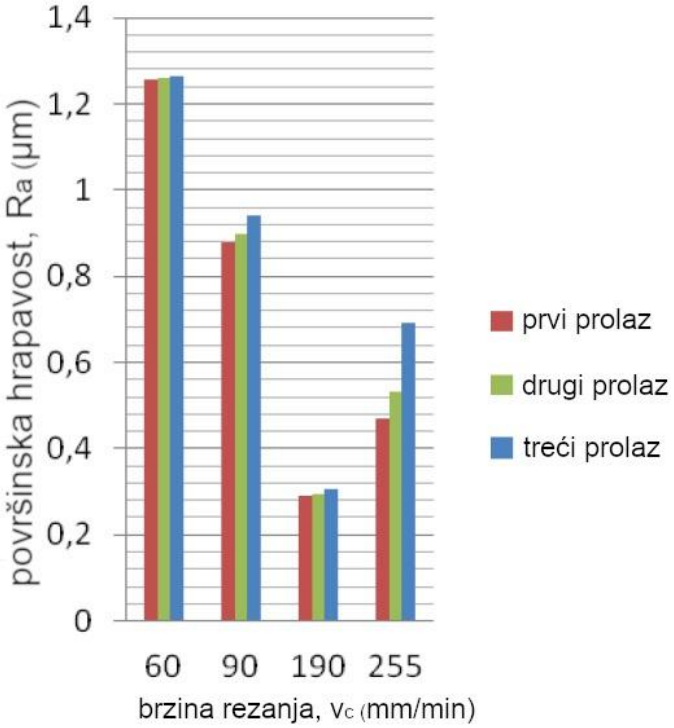
- veće tehnološke mogućnosti (obrada: kaljenih čelika, teškoobradivih materijala, tankostjenih profila, materijala osjetljivih na toplinu)
- poboljšanje kvalitete (smanjenje hrapavosti, manja oštećenja površinskih slojeva, nema vibracija)
- kraće vrijeme obrade (veća brzina rezanja, veće posmične brzine, veći volumen odvojenih čestica u jedinici vremena)
- manji troškovi (kraće komadno vrijeme, veća vremenska iskoristivost stroja, moguća suha obrada)

Primjena:

- izrada geometrijski točnih kalupa kvalitetnih površina
- izrada impelera
- izrada kalupa za injekcijsko puhanje
- izrada elektroda od grafita i bakra za elektroerozijsku obradu
- automobilska i zrakoplovna industrija

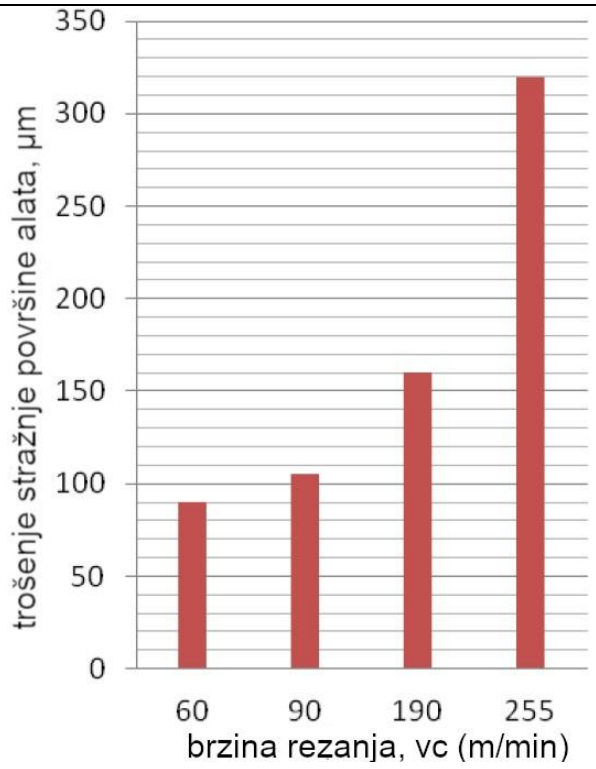
Provode se mnoga istraživanja na području visokobrzinske obrade i obrade teškoobradivih materijala, kao što su kaljeni čelici, titanove legure (Ti6Al4V), legure kroma i kobalta, superlegure itd. Jedno od tih istraživanja je provedeno pri tokarenju različitim glavnim brzinama, $v_c$, a promatralo se trošenje alata i površinska hrapavost. Materijal obratka koji se koristi je superlegura na bazi nikla, trgovačkog naziva Inconel 718, koja se smatra jednom od najteže obradivih materijala. Zbog visoke čvrstoće, otpornosti na koroziju i visoke temperature, imaju široku upotrebu u zrakoplovnoj industriji (npr. diskovi i lopatice u visokotlačnim kompresorima i turbinama – dijelovi motora zrakoplova kod kojih se razvijaju najviše temperature), u izradi turbina i kod nuklearnih elektrana. [11] Tvrdoća materijala Inconel 718 je 65 HRC, rezna pločica je od prevučenog tvrdog metala, brzine obrade su u iznosu od 60 m/min, 90 m/min, 190 m/min i 255 m/min. Posmak (f = 0,1 mm/okr) i dubina obrade ($a_p$ = 0,5 mm) su konstantni. Dužina obrade je 30 mm, obrada je u tri prolaza i uz prisustvo SHIP-a (sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje). Nakon svakog prolaza je

mjerena površinska hrapavost i trošenje alata. Rezultati mjerenja su dani u dijagramu (Slika 5). [12]




**Slika 5 Dijagram površinska hrapavost, Ra – brzina rezanja, $v_c$ [12]**

Može se primijetiti kako je pri nižim brzinama obrade – 60 m/min i 90 m/min, površinska hrapavost znatno veća od one koja se dobiva obradom pri brzinama od 190 m/min i 255 m/min. Ističe se i to što je hrapavost površine dobivene obradom pri 255 m/min veća u odnosu na hrapavost koja je dobivena obradom pri 190 m/min. Do veće hrapavosti, u slučaju brzine obrade od 255 m/min, dolazi zbog zareznog trošenja na alatu koje nastaje pri tako visokim brzinama. Također se samo kod obrade brzinom od 255 m/min javlja odstupanje u površinskim hrapavostima nakon pojedinog prolaza, što se objašnjava sve većim trošenjem alata, a to ima direktan negativan utjecaj na površinu. Na sljedećoj slici (Slika 6) se može vidjeti iznos trošenja na stražnjoj površini alata u odnosu na brzinu rezanja.

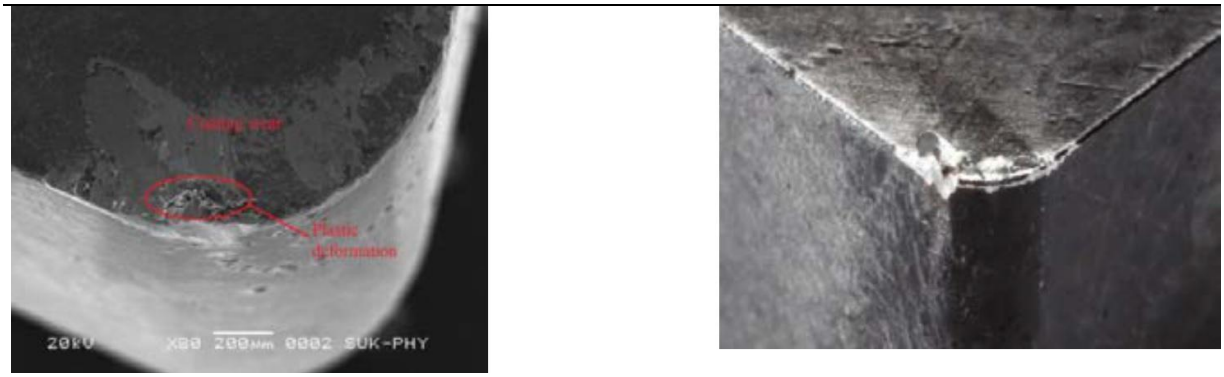



**Slika 6 Dijagram trošenja na stražnjoj površini alata u odnosu na brzinu rezanja [12]**

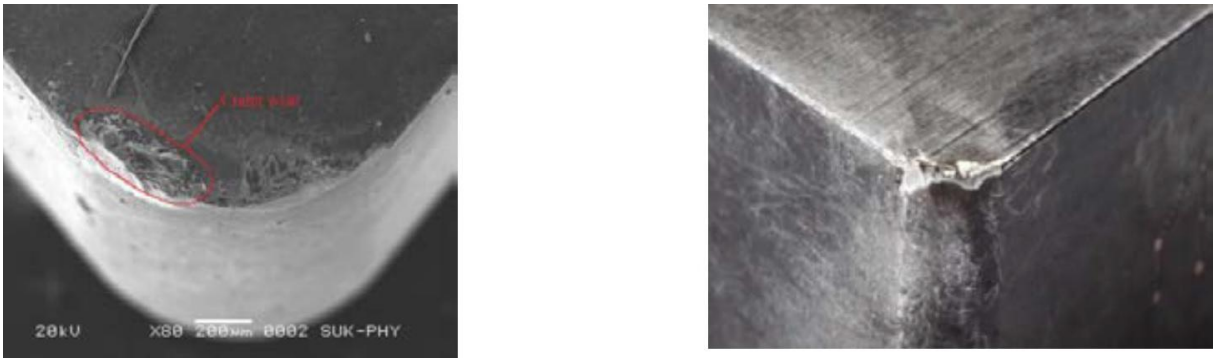
Smatra se da do velikog trošenja pri brzinama rezanja od 190 m/min i 255 m/min dolazi jer je Inconel 718 teškoobradivi materijal pri čijoj se obradi visokim brzinama razvija velika količina topline koja uzrokuje trošenje alata. Do takve pojave velike količine topline ne dolazi pri obradi brzinama od 60 m/min i 90 m/min stoga je trošenje manje. Najintenzivnije trošenje se javlja pri obradi brzinom od 255 m/min.

Dani su i prikazi trošenja na alatu (lijevo – SEM (skenirajući elektronski mikroskop; scanning electron microscope) slike; desno – fotografije visoke rezolucije (high resolution photography)):

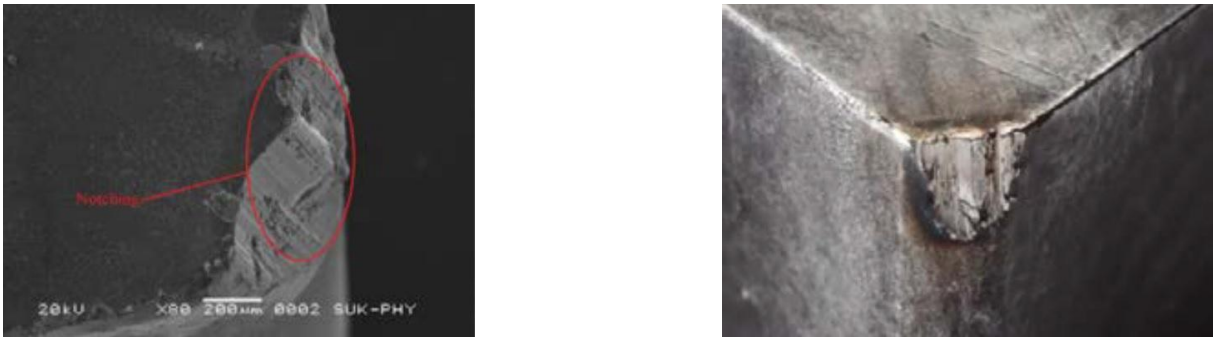
**Slika 7 Izgled trošenja alata – kratersko trošenje ($v_C$ = 60 m/min) [12]**




**Slika 8 Izgled trošenja alata – kratersko trošenje ($v_C$ = 90 m/min) [12]**

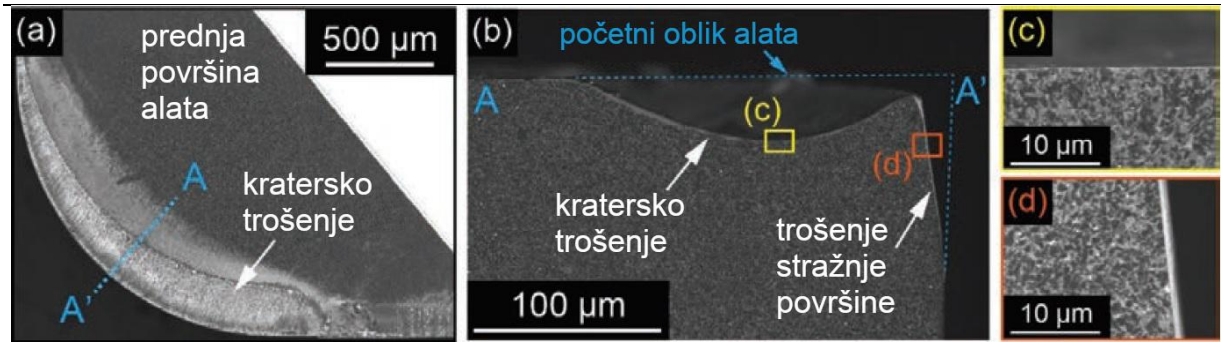



**Slika 9 Izgled trošenja alata – kratersko trošenje ($v_C$ = 190 m/min) [12]**




**Slika 10 Izgled trošenja alata – zarezno trošenje ($v_C$ = 255 m/min) [12]**

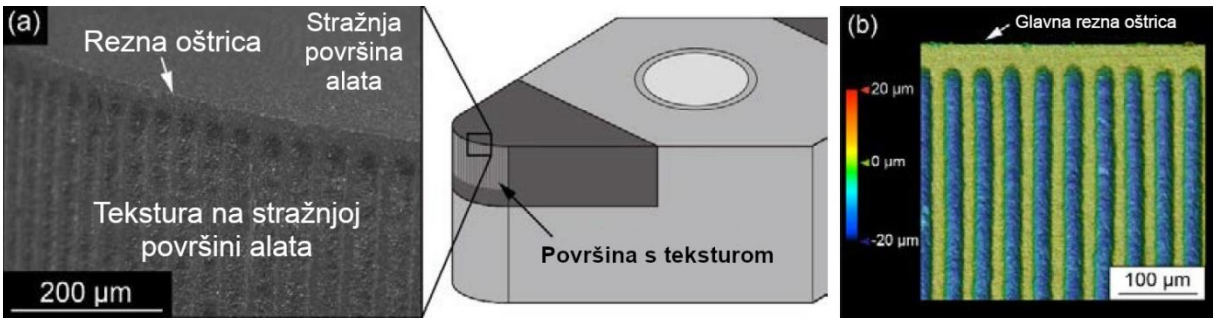
Tijekom istraživanja provedenog na visokobrzinskom tokarenju materijala Inconel 718 (superlegure na bazi nikla) alatom od kubičnog nitrida bora (cubic boron nitride, CBN), promatrano je kako određena tekstura izrađena na stražnjoj površini alata utječe na trošenje alata. Naime, prilikom obrade superlegura dolazi do intenzivnog trošenja alata, čak i onog izrađenog od CBN-a, za kojeg se, kako je spomenuto, smatra da je drugi najtvrđi materijal. Trošenje dovodi do poravnavanja stražnje površine alata (Slika 11) čime se povećava kontaktna površina između alata i obrađene površine obratka, a time se dodatno otežava dovod SHIP-a u zonu rezanja (shematski prikaz: Slika 12, lijevo). [11]




**Slika 11 Trošenje prednje i stražnje površine alata od CBN-a ($v_C$ = 500 m/min, dužina obrade: 400 m) [11]**

**Slika 12 Shematski prikaz: (lijevo) poravnanje stražnje površine alata bez teksture i otežan dovod SHIP-a; (desno) utjecaj mikro utora na dovod SHIP-a do zone rezanja [11]**

Stoga se nastoji pospješiti dovod sredstva izradom teksture na stražnjoj površini (Slika 12, desno) i smanjiti trošenje. Postavke istraživanja su sljedeće: tvrdoća obratka je 40 HRC, brzine rezanja su 100 m/min i 500 m/min. Posmak (f = 0,1 mm/okr) i dubina rezanja ($a_p$ = 1,5 mm) su konstantni. Dužina obrade je 400 m, obrada se izvodila s alatom od CBN-a s teksturom i glatkim (bez teksture) alatom u uvjetima: uz SHIP (6,1 L/min, 0,3 MPa = 3 bara) i kao suha obrada. Tekstura u obliku mikro utora okomitih na glavnu oštricu, izrađena je laserom. Tekstura je od same oštrice udaljena 30 µm kako bi se održala čvrstoća oštrice. Prikaz izgleda teksture:

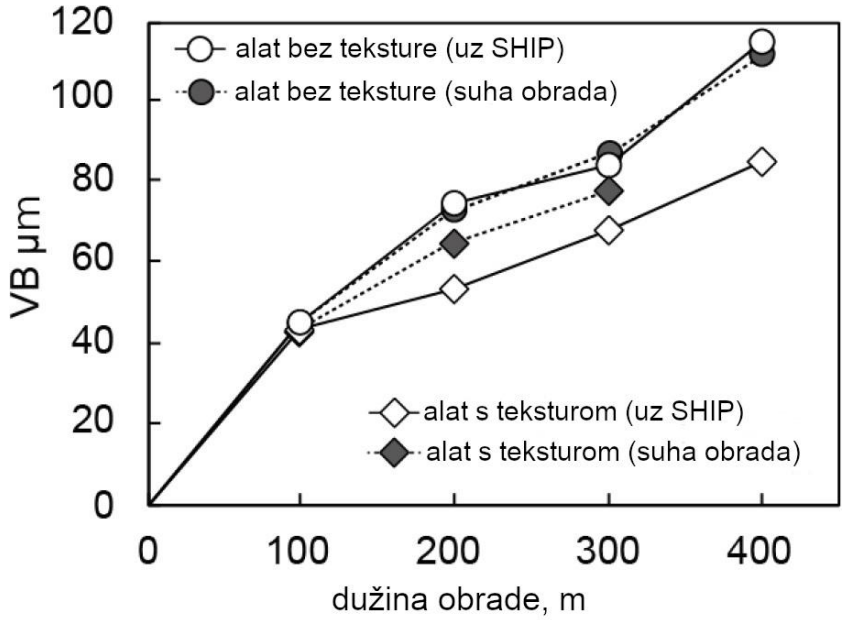



**Slika 13 Izvedba mikro utora (teksture) na stražnjoj površini alata [11]**

Rezultati mjerenja su dani u dijagramu (Slika 14) koji prikazuje trošenje alata u ovisnosti o dužini obrade za:

a) alat bez teksture (obrada uz SHIP: ○, suha obrada: ●)

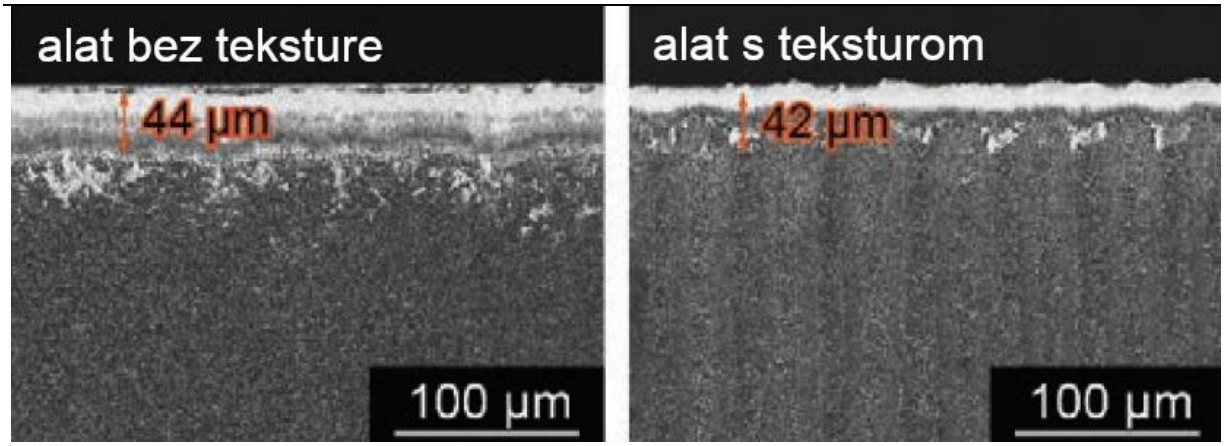
b) alat s mikro utorima (obrada uz SHIP: ◊, suha obrada: ♦)



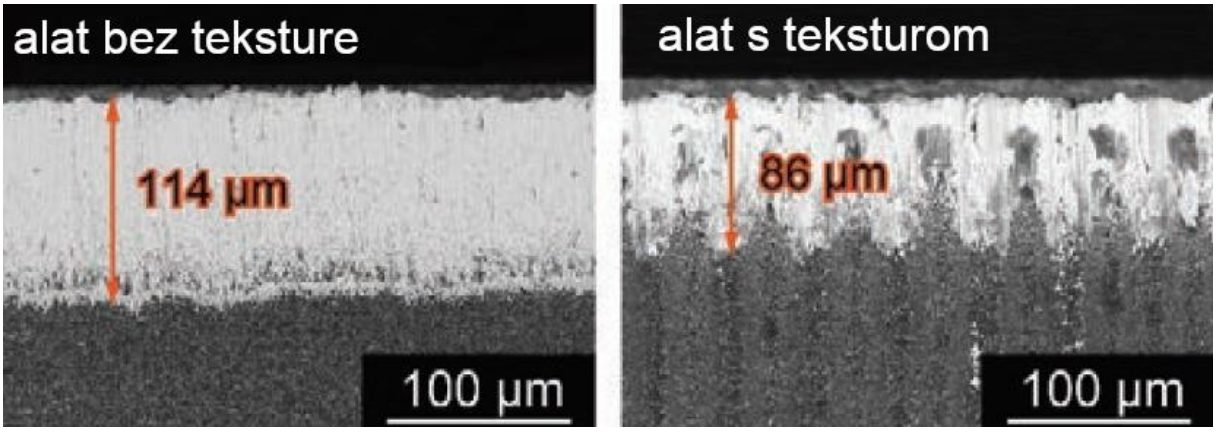

**Slika 14 Trošenje alata, VB u ovisnosti o dužini obrade (za alat s i bez utora; s i bez SHIP-a; $v_C$ = 500 m/min) [11]**

Dani su i SEM (skenirajući elektronski mikroskop) prikazi trošenja na stražnjoj površini:

- alata bez teksture i alata s mikro utorima, nakon obrade uz SHIP, na dužini od: 100 m ($v_c$ =500 m/min) (Slika 15)
- alata bez teksture i alata s mikro utorima, nakon obrade uz SHIP, na dužini od: 400 m ($v_c$ =500 m/min) (Slika 16)




**Slika 15 Stražnja površina (dužina obrade: 100 m): lijevo – alata bez teksture, desno – alata s mikro utorima ($v_C$ = 500 m/min) [11]**




**Slika 16 Stražnja površina (dužina obrade: 400 m): lijevo – alata bez teksture, desno – alata s mikro utorima ($v_C$ = 500 m/min) [11]**

(Napomena: prikazi stražnjih površina nakon suhe obrade nisu dani zbog toga što je na dužini obrade od 300 m došlo do iznenadnog loma alata.)

Iz dobivenih rezultata se može zaključiti kako se mikro utorima na stražnjoj površini alata pospješuje dovod SHIP-a do zone rezanja prilikom visokobrzinske obrade superlegure Inconel 718 alatom od CBN-a, čime se smanjuje njegovo trošenje. Kod suhe obrade se također primijetilo kako je izradom teksture na stražnjoj površini alata smanjeno trošenje, a objašnjava se time što utori smanjuju kontaktnu površinu alata i obratka. [11]

## 2.2. Obrada uz minimalnu količinu sredstva za hlađenje i podmazivanje (Minimum quantity cooling lubrication, MQCL)

Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP) je vrlo važna komponenta obradnog sustava jer mu je zadaća smanjiti trošenje alata, osigurati kvalitetu površine i geometrijsku točnost obradaka (smanjiti toplinsko rastezanje koje bi uzrokovalo promjenu dimenzija), odvoditi (ispirati) odvojene čestice i smanjiti toplinski utjecaj na alatni stroj. Uz pozitivan

utjecaj na obradu, postoje vrlo naglašene negativne strane. Naime, količine sredstva od 10 do 100 L/min se koriste prilikom „normalne“ ili mokre obrade (wet machining). Korištenje, odvajanje te pravilno odlaganje tolikog volumena SHIP-a, tvrtkama generira vrlo veliki trošak (od ukupnog troška obrade, troškovi alata čine: 2 – 4%, ostali troškovi: 79 – 87%, a troškovi SHIP-a: 11 – 17%; izvor: RWTH Aachen). SHIP ima i negativan utjecaj na okoliš zbog čega se provode stroge regulacije i naplate korištenja SHIP-a. Stoga je veliki naglasak na razvoju, tzv. MQCL obrade ili obrade uz minimalnu količinu sredstva za hlađenje i podmazivanje. Kada se koristi akronim MQCL najčešće se pod time podrazumijeva dopremanje SHIP-a u obliku aerosola (suspenzije čestica krutih tvari ili kapljica tekućine promjera manjeg od 1 μm, u plinu [13]), s time da se može razlikovati minimalno podmazivanje (minimum quantity lubrication, MQL) i minimalno hlađenje (minimum quantity cooling, MQC). O MQL obradi se radi kada se primjenom ulja nastoji smanjiti trenje i adhezija (na sučeljima obradak, alat i odvojena čestica) čime se smanjuje količina nastale topline, ali se hlađenje stavlja na drugo mjesto dok je podmazivanje na prvom. S druge strane za MQC obradu se koriste emulzija i voda, što inače nije značajnije zastupljeno te se pojam MQC puno rjeđe koristi i malo se istražuje u odnosu na MQL. Dakle uz MQCL, se jako često koristi i akronim MQL za ovu vrstu obrade. [10], [14]

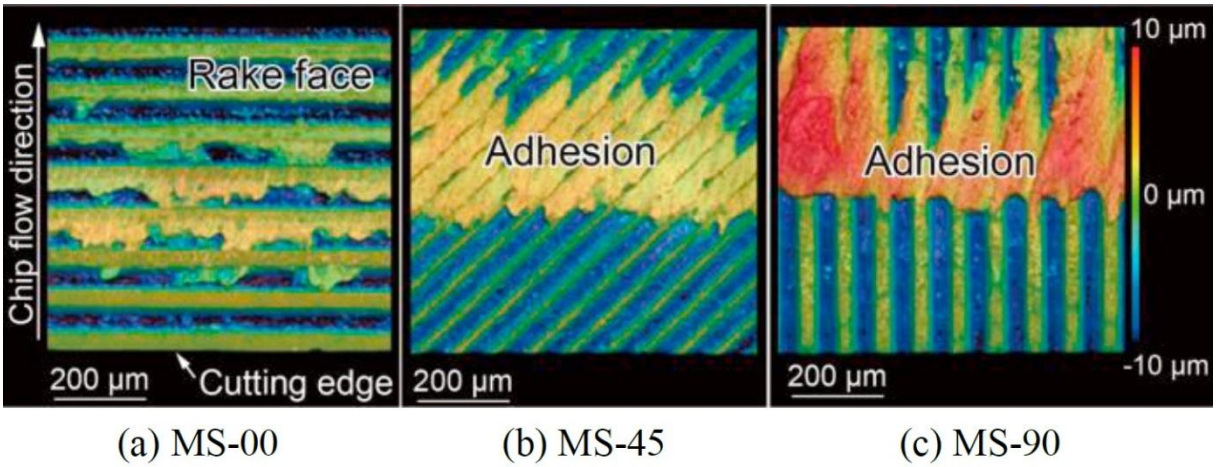
MQCL obradom se količina SHIP-a smanjuje na 10 do 50 mL/h. Kao što je spomenuto, doprema se u obliku aerosola u zonu rezanja gdje, dokazano, smanjuje temperaturu i povećava vijek trajanja oštrice alata, a koriste se biljna ulja i esteri. [10], [14]

Ovakva obrada se često naziva i „skoro suha“ (near-dry machining). Ako se SHIP prilikom obrade uopće ne dovodi, dobiva se „suha“ obrada (dry machining). Kako bi ovakve obrade bile moguće, potrebno je koristiti odgovarajuće materijale reznih alata: tvrdi metali s višeslojnim prevlakama (meke ili samopodmazujuće prevlake, CBN i dijamantne prevlake), CBN ili keramika. Alati bi trebali imati visoku tvrdoću (i na povišenim temperaturama) i otpornost na tlak, veliku žilavost, kemijsku postojanost i postojanost na toplinski zamor. [15], [14]

Prilikom suhe obrade, na primjer aluminijskih legura, na prednjoj površini alata dolazi do stvaranja naljepka i značajnog adhezijskog trošenja alata. Istraživanja su pokazala kako se izradom određenih tekstura na prednjoj i stražnjoj površini alata, može značajno smanjiti ta negativna pojava. Prikazat će se takva dva primjera površinskih tekstura. [16]

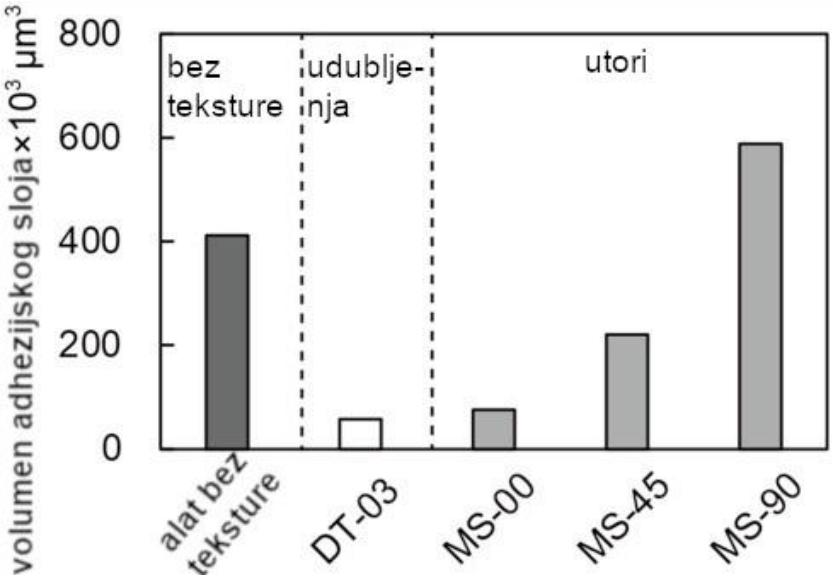
1. Utori mikroskopske veličine (micro-grooves) izrađeni na prednjoj površini, značajno su smanjili adheziju na alatu, ali je nedostatak što taj učinak (smanjenje adhezije) ovisi

o smjeru pružanja utora – ako se smjer podudara sa smjerom gibanja odvojene čestice, čak dolazi do pojačavanja adhezijskog djelovanja (Slika 17, slika (c)). [16]




**Slika 17 Razina adhezijskog djelovanja na prednju površinu alata u ovisnosti o smjeru pružanja mikro utora na prednjoj površini alata (dužina obrade: 1800 m) [16]**

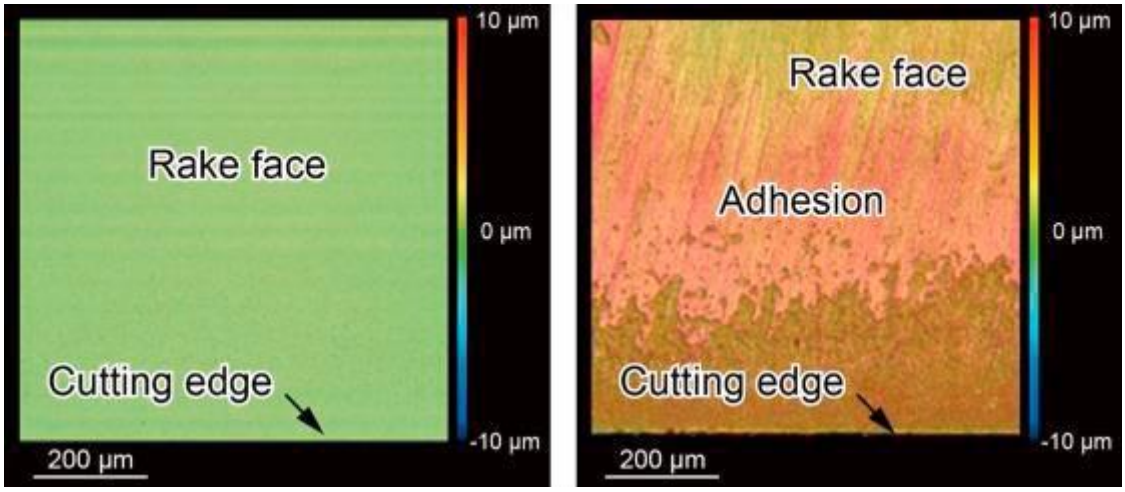
Na sljedećoj slici se može vidjeti odnos volumena nastalog adhezijskog sloja kod alata bez teksture na prednjoj površini (konvencionalni alat), alata s mikro udubljenjima (micro-dimples), čija će se primjena detaljnije promatrati u točki 2, i tri alata s tri različite orijentacije mikro utora čiji se izgledi mogu vidjeti na prethodnoj slici (Slika 17). Odnosi volumena potvrđuju kako se kod alata čiji se smjer mikro utora podudara sa smjerom pružanja odvojene čestice, javlja najintenzivnije adhezijsko djelovanje.



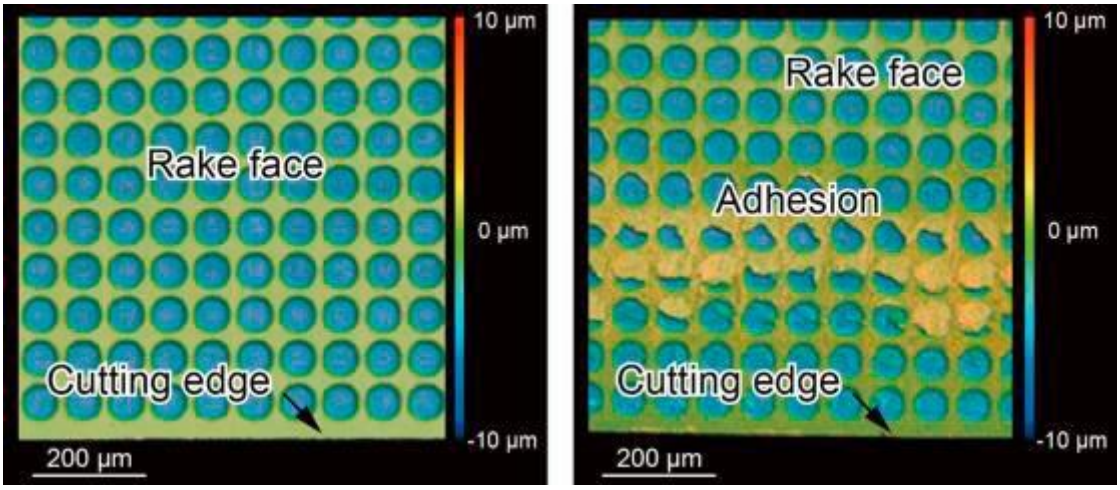

**Slika 18 Volumen nastalog adhezijskog sloja na alatu: bez površinske teksture, s mikro udubljenjima (DT-03) i s mikro utorima (tri različita smjera pružanja – MS – 00,45,90) [16]**

2. Tekstura u obliku udubljenja mikroskopske veličine razvijena je s ciljem dobivanja teksture čiji pozitivan utjecaj na problem adhezijskog trošenja alata ne ovisi o

orijentaciji teksture. Postavke istraživanja su sljedeće: materijal obratka je aluminijska legura, materijal alata je tvrdi metal, brzina obrade, $v_c$ = 380 m/min (frekvencija vrtnje glavnog vretena, n = 1500 okr/min), posmak ($f_z$ = 0,12 mm/zubu) i dubina rezanja ($a_p$ = 3 mm) su konstantni, dužina obrade je 1800 m i uvjeti su suhe obrade. Istraživanje je pokazalo kako se takvom vrstom teksture bitno smanjuje stvaranje adhezijskog sloja na prednjoj površini alata prilikom suhog glodanja aluminijskih legura. Smanjenje volumena adhezijskog sloja koji nastaje na alatu s mikro udubljenjima u usporedbi s volumenom koji nastaje na alatu bez teksture, može se vidjeti na prethodnoj slici (Slika 18), prvi i drugi stupac. Za usporedbu su dani i prikazi: adhezijskog djelovanja na alatu bez teksture (Slika 19, desno) i adhezijsko djelovanje na alatu s mikro udubljenjima na prednjoj površini alata (Slika 20, desno). [16]

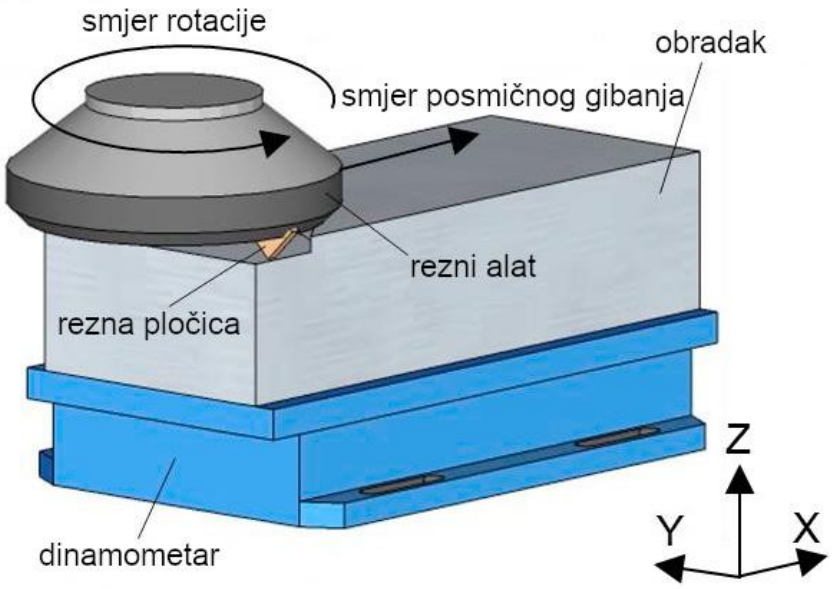



**Slika 19 Prikaz prednje površine alata bez teksture: prije obrade (lijevo), nakon obrade (desno) (dužina obrade: 1800 m) [16]**



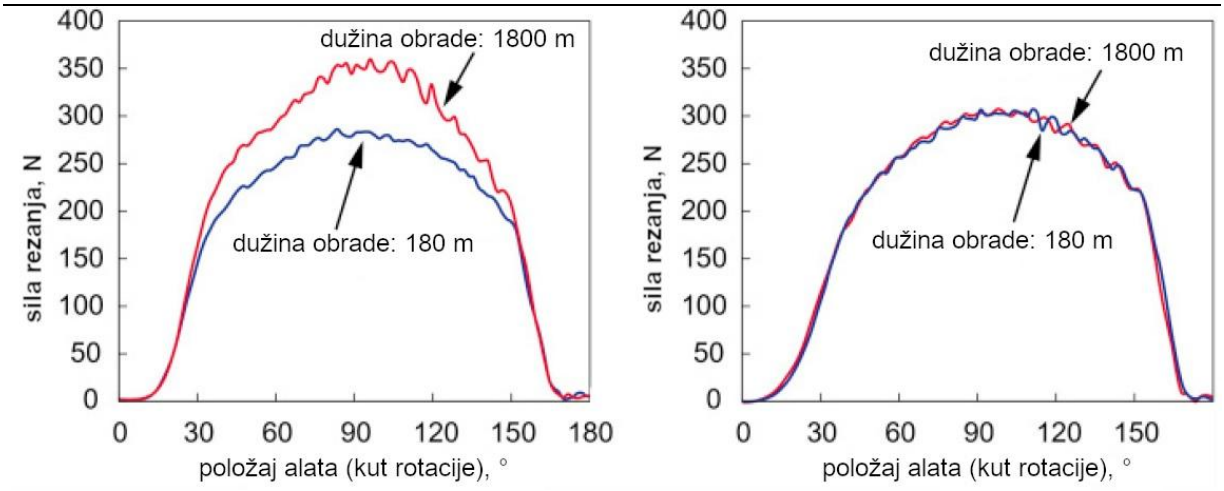

**Slika 20 Prikaz prednje površine alata s mikro udubljenjima: prije obrade (lijevo), nakon obrade (desno) (dužina obrade: 1800 m)**

Osim što se udubljenjima na prednjoj površini alata, smanjuje adhezijsko trošenje prilikom suhe obrade aluminijskih legura, također je utvrđeno da ta tekstura ima pozitivan utjecaj i na rezultantnu silu koja djeluje tijekom glodanja. U istraživanju su dinamometrom mjerene i tri komponente od kojih se sastoji rezultantna sila, $F_R$.




**Slika 21 Prikaz načina izvođenja eksperimenta [16]**

U eksperimentu glodalo ima kut zahvata, $\varphi_s$ otprilike 180°, odnosno od ukupnih 360° jednoga kruga, tj. rotacije koju napravi alat, otprilike 180° je u obradi (Slika 21 daje prikaz situacije) stoga su za taj raspon i dani rezultati u dijagramu. Na dužini obrade od 180 m i 1800 m su izmjerene sile koje djeluju na alat bez teksture i na alat s mikro udubljenjima na prednjoj površini alata (Slika 22). Kod alata bez teksture, na dužini obrade od 1800 m, je porasla rezultantna sila rezanja (Slika 22, lijevo). Dano je objašnjenje: uslijed oštećenja prednje površine alata nastalog povećanim adhezijskim trošenjem dolazi do povećanja trenja između prednje površine i odvojene čestice za koje je potrebna veća sila za savladavanje. Kod alata s udubljenjima na prednjoj površini alata ne dolazi do povećanja, čak niti nakon dužine obrade od 1800 m (Slika 22, desno).




**Slika 22 Dijagram sila – položaj alata (kut rotacije) (dužina obrade: 180 m i 1800 m): lijevo – alat bez teksture, desno: alat s udubljenjima na prednjoj površini [16]**

## 2.3. Kriogena obrada (Cryogenic machining)

Još jedna ekološki prihvatljiva varijanta obrade je i kriogena obrada. Hlađenje tekućim dušikom ($LN_2$) putem mlaznica se koristi, npr. u obradi čelika. U takvim uvjetima se postižu manje sile rezanja, manje trošenje alata i bolji integritet površine. [15]

Istraživanje je pokazalo:

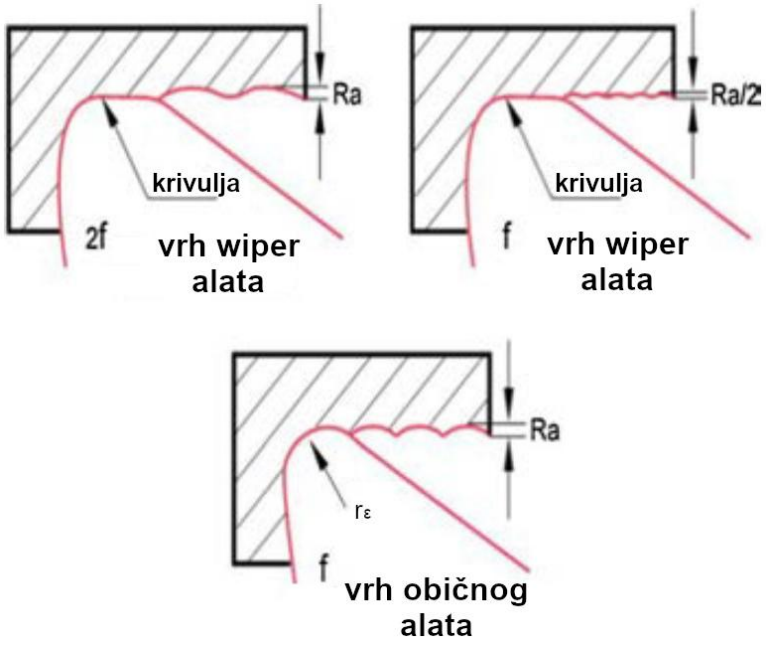
- za jednake parametre obrade (f = konst. = 0,2 mm/okr; $v_c$ = 70, 110, 150 m/min) su se kriogenim tokarenjem Ti6Al4V ostvarile: manja glavna sila rezanja, $F_c$ i manja posmična sila, $F_f$ u odnosu na suho tokarenje [17]

## 2.4. Tvrda obrada (Hard machining)

Kada se govori o tvrdoj obradi, najčešće se podrazumijeva obrada čelika visoke tvrdoće – od 45 do 65 HRC. Za obradu takvih i ostalih tvrdih materijala moguće je, odabirom odgovarajućeg materijala alata i odabirom alatnog stroja visoke krutosti, snage i točnosti, primijeniti konvencionalne obrade za kvalitetnu obradu tvrdih materijala. Kao materijali reznih alata mogu se koristiti: kubični nitrid bora (CBN), cermet ili keramika. Tvrda obrada se obično odvija pri visokim glavnim brzinama rezanja uslijed kojih visoki udio nastale topline odlazi s odvojenom česticom te uglavnom nema potrebe za primjenom SHIP-a. Primjenjuje se u automobilskoj industriji, za izradu zupčanika, ležajeva, alata i kalupa itd. Kod glodanja tvrdih materijala čak se i preporučuje suha obrada kako bi se izbjegao temperaturni šok alata koji ubrzava njegovo trošenje. Glodanjem se mogu obrađivati: kalupi za kovanje, kalupi za lijevanje, pumpe za dovod goriva itd. Za završnu obradu tvrdih materijala se tokarenje danas često smatra efektivnom i ekonomičnom alternativom brušenju. Tokarenjem tvrdih materijala

bi se postigla veća fleksibilnost što se tiče složenosti geometrije obratka koja se može obraditi, mogla bi se povećati produktivnost i u isto vrijeme imati pozitivan utjecaj na okoliš s obzirom na to da pri tvrdoj obradi nije potrebno koristiti SHIP (odvojene čestice se mogu reciklirati). [18], [14], [19]

S ciljem dobivanja načina obrade koji bi mogao uspješno zamijeniti brušenje kao obradu materijala visoke tvrdoće i kako bi se postigle prednosti i ostvarile mogućnosti koje su gore navedene, provedeno je istraživanje u kojem su se usporedile površinske hrapavosti nakon tokarenja „wiper“ reznom pločicom i običnom reznom pločicom. Također se promatrao utjecaj broja okretaja, posmaka, dubine rezanja i polumjera vrha alata, $r_\varepsilon$ (i konvencionalnog i wiper) na površinsku hrapavost. U ovom se slučaju, pod pojmom obične pločice (conventional - C), podrazumijevaju pločice koje imaju samo jedan polumjer vrha alata, dok se wiper pločica uz glavni polumjer, sastoji i od više točno određenih manjih polumjera (Slika 15). [20]




**Slika 23 Izvedba wiper (1. red) i obične (2. red) pločice te usporedba postizivih rezultata wiper pločicom (1. red) [20]**

Tako dobivenom geometrijom rezne oštrice se mogu poravnati vrhovi neravnina, koji kod obrade običnom pločicom ostaju i povećavaju hrapavost. Slika 23 u gornjem dijelu prikazuje kako se u usporedbi s obradom običnom reznom pločicom, također može:

- uz dvostruko veći posmak (2f) postići jednaka hrapavost (Ra) ili
- se za jednaki posmak (f) može postići dvostruko manja hrapavost površine (Ra/2)

Postavke eksperimenta su sljedeće: tvrdoća čelika je 55 HRC, dužina obrade je 25 mm, 36 uzoraka i za svaki je korištena nova rezna oštrica. Primijenile su se 3 različite vrijednosti posmaka (f), broja okretaja (n) i dubine rezanja ($a_p$), te 2 različite vrste pločica i polumjera vrha alata, $r_\varepsilon$. Parametre se može vidjeti na sljedećoj slici (Slika 24):

| Razina | Rezna pločica **(C/W)** | Polumjer vrha alata, $r_\varepsilon$ (mm) | Broj okretaja, n (1/min) | Posmak, f (mm/okr) | Dubina rezanja, $a_p$ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | C (Conventional) | 0.8 | 960 | 0.08 | 0.1 |
| 2 | W (Wiper) | 1.2 | 1500 | 0.15 | 0.3 |
| 3 | | | 1800 | 0.2 | 1.5 |

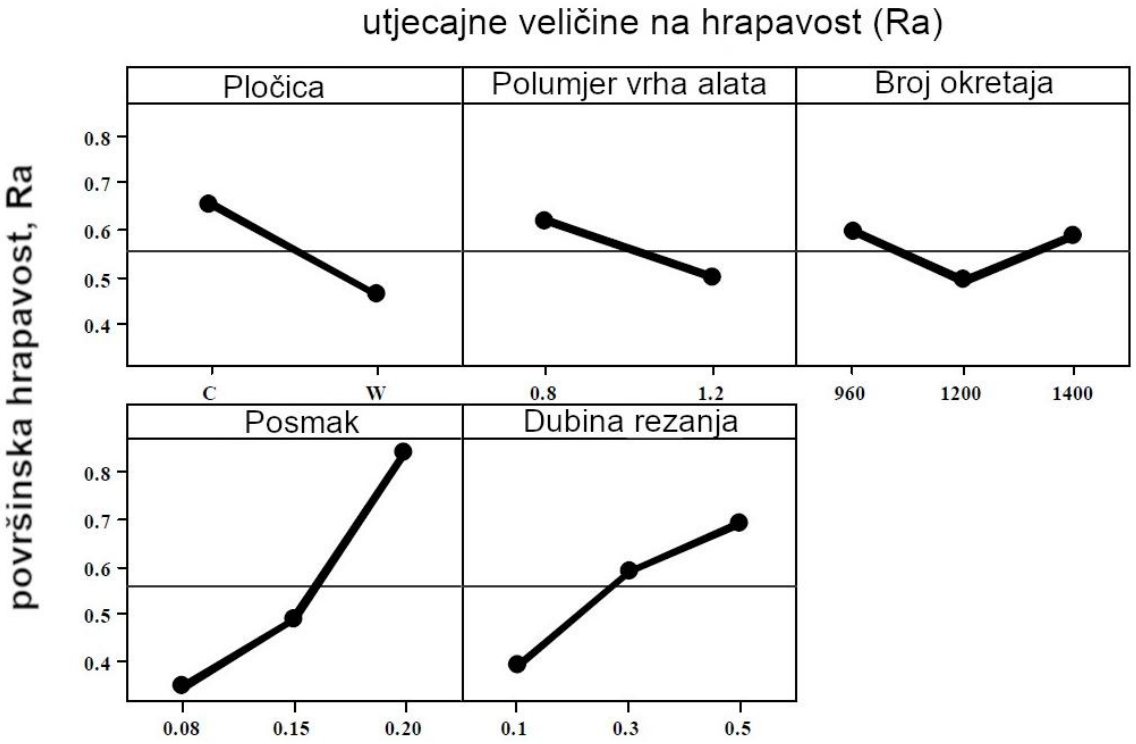
**Slika 24 Parametri korišteni prilikom istraživanja [20]**

Rezultati mjerenja su dani u tablici na sljedećoj slici (Slika 25):

| Rezna pločica | $r_\varepsilon$, mm | n, 1/min | f, mm/okr | $a_p$, mm | Ra |
|---|---|---|---|---|---|
| C | 0.8 | 960 | 0.15 | 0.1 | 0.300 |
| C | 0.8 | 1200 | 0.20 | 0.3 | 0.760 |
| C | 0.8 | 1400 | 0.08 | 0.5 | 0.371 |
| C | 0.8 | 960 | 0.15 | 0.3 | 0.948 |
| C | 0.8 | 1200 | 0.20 | 0.5 | 0.899 |
| C | 0.8 | 1400 | 0.08 | 0.1 | 0.331 |
| C | 0.8 | 960 | 0.20 | 0.3 | 0.755 |
| C | 0.8 | 1200 | 0.08 | 0.5 | 0.425 |
| C | 0.8 | 1400 | 0.15 | 0.1 | 0.638 |
| C | 1.2 | 960 | 0.20 | 0.3 | 0.886 |
| C | 1.2 | 1200 | 0.08 | 0.5 | 0.512 |
| C | 1.2 | 1400 | 0.15 | 0.1 | 0.328 |
| C | 1.2 | 960 | 0.20 | 0.5 | 1.241 |
| C | 1.2 | 1200 | 0.08 | 0.1 | 0.495 |
| C | 1.2 | 1400 | 0.15 | 0.3 | 0.655 |
| C | 1.2 | 960 | 0.20 | 0.1 | 1.143 |
| C | 1.2 | 1200 | 0.08 | 0.3 | 0.655 |
| C | 1.2 | 1400 | 0.15 | 0.5 | 0.414 |
| W | 0.8 | 960 | 0.08 | 0.1 | 0.109 |
| W | 0.8 | 1200 | 0.15 | 0.3 | 0.628 |
| W | 0.8 | 1400 | 0.20 | 0.5 | 1.701 |
| W | 0.8 | 960 | 0.08 | 0.1 | 0.154 |
| W | 0.8 | 1200 | 0.15 | 0.3 | 0.714 |
| W | 0.8 | 1400 | 0.20 | 0.5 | 1.249 |
| W | 0.8 | 960 | 0.08 | 0.3 | 0.320 |
| W | 0.8 | 1200 | 0.15 | 0.5 | 0.210 |
| W | 0.8 | 1400 | 0.20 | 0.1 | 0.599 |
| W | 1.2 | 960 | 0.08 | 0.5 | 0.442 |
| W | 1.2 | 1200 | 0.15 | 0.1 | 0.172 |
| W | 1.2 | 1400 | 0.20 | 0.3 | 0.435 |
| W | 1.2 | 960 | 0.15 | 0.5 | 0.338 |
| W | 1.2 | 1200 | 0.20 | 0.1 | 0.181 |
| W | 1.2 | 1400 | 0.08 | 0.3 | 0.143 |
| W | 1.2 | 960 | 0.15 | 0.5 | 0.499 |
| W | 1.2 | 1200 | 0.20 | 0.1 | 0.234 |
| W | 1.2 | 1400 | 0.08 | 0.3 | 0.174 |

**Slika 25 Rezultati mjerenja površinske hrapavosti za pojedinu kombinaciju parametara [20]**

Na temelju tih podataka mogu se dobiti i dijagrami koji pokazuju kako površinska hrapavost ovisi o parametrima koji se smatraju najutjecajnijim na hrapavost (Slika 26):




**Slika 26 Dijagramski prikaz ovisnosti hrapavosti o parametrima s najvećim utjecajem [20]**

U industrijskom pogonu u kojem se za obradu svornjaka koristi brušenje, je provedena usporedba obrade običnom pločicom, wiper pločicom i brušenjem. Dobiveni su rezultati:

| **Vrsta procesa / pločice** | **Ra** |
|---|---|
| Brušenje | 0.193 µm |
| Obična rezna pločica | 0.652 µm |
| Wiper rezna pločica | 0.197 µm |

**Slika 27 Površinska hrapavost nakon obrade običnom i wiper pločicom te brušenjem [20]**

Zaključeno je da se tokarenjem wiper pločicom može dobiti bolja površinska obrada, tj. manja površinska hrapavost u odnosu na običnu pločicu i približno jednaki rezultati u usporedbi s brušenjem te je također utvrđeno da posmak najviše utječe na površinsku hrapavost. [20]

## 2.5. Tokarenje „prime“ (PrimeTurning™)

Ovaj novi pristup tokarenju njegovi izumitelji nazivaju „Ponovno izumljeno tokarenje“. Radi se o tokarenju koje se od uobičajenog tokarenja razlikuje po tome što se alat može gibati u svim smjerovima. Karakterizira ga i dvostruko veći posmak i brzina te dugotrajnije rezne pločice, a time i kraće vrijeme obrade čime se može postići i do 50% veća produktivnost. Dvije vrste pločica se koriste za ovu vrstu obrade i prema podacima tvrtke SANDVIK, B tip

pločice se koristi za veće dubine rezanja i posmake. Prikazi pločica se mogu vidjeti na sljedeće dvije slike:

**Slika 28 A tip rezne pločice [21]**

**Slika 29 B tip rezne pločice [21]**

Predstavili su jedan primjer iz industrijske primjene. Radi se o gruboj obradi superlegure uz prisustvo SHIP-a u obliku emulzije. Parametri obrade i rezultati (Tablica 1):

**Tablica 1 Rezultati obrade pločicom za PrimeTurning™ i uobičajenom pločicom [21]**

| | Pločica druge tvrtke | CoroTurn™ Prime B-type |
|---|---|---|
| $f_n$ (mm/okr) | 0,3 | 0,8 |
| $a_p$ (mm) | 2 | 4 |
| REZULTATI | | |
| Ukupno vrijeme obrade | 02:42 min | 01:36 min |

Prime tokarenjem ostvarilo se znatno kraće vrijeme obrade. Također su dani podaci o volumenu odvojene čestice u jedinici vremena: 480 $cm^3$/min i proračunat je porast produktivnosti za 85%. [21]

# 3. NEKONVENCIONALNI (NAPREDNI) POSTUPCI OBRADE ODVAJANJEM

Razvoj tehničkih materijala i poboljšanje njihovih mehaničkih svojstava predstavljaju izazov za konvencionalne postupke i rezne alate koji svoju funkciju odvajanja materijala obavljaju zahvaljujući tvrdoći većoj od tvrdoće obratka. Na primjer, kod obrada materijala kao što su polikristalični dijamant i keramika koje karakterizira izrazito visoka tvrdoća, javlja se problem produktivnosti, kvalitete obrade i ekonomičnosti konvencionalnih postupaka. [22] Materijali koji imaju veću čvrstoću, omjer čvrstoće i gustoće, bolja optička, električna, toplinska ili kemijska svojstva u odnosu na tradicionalne materijale nazivaju se napredni materijali. [23] Interes industrije za takvu vrstu materijala sve je veći. Smanjeni troškovi i povećana profitabilnost postižu se dugotrajnošću naprednih materijala i njihovom primjenom za rješavanje eventualnih funkcionalnih ili proizvodnih problema. Zadovoljstvo kupca proizvodom može biti značajno veće jer se korištenjem naprednih materijala može napraviti proizvod koji će biti bliže idealnom proizvodu kojeg korisnik priželjkuje. Korištenjem naprednih materijala može se lakše postići održivost koju nalažu razne regulative, ali i kojoj se u današnje vrijeme općenito teži. [24] Uz pojavu novih materijala, izazove također predstavljaju traženi kompleksniji oblici dijelova, njihova mala krutost ili dijelovi mikroskopske veličine sa zahtijevanim uskim tolerancijama i visokom kvalitetom površine. [22] Sve te pojave bile su pokretači razvoja novih vrsta postupaka obrade – tzv. naprednih proizvodnih procesa (nekonvencionalnih postupaka obrade ili obrade odnošenjem).

Prema [22] se nekonvencionalni postupci mogu prema broju postupaka obrade uslijed kojih dolazi do odvajanja materijala s obratka, podijeliti na: pojedinačne nekonvencionalne postupke (najčešće se o ovoj podskupini govori kada se koristi pojam nekonvencionalne obrade) i hibridne postupke.

## 3.1. Pojedinačni nekonvencionalni postupci (Single-action nontraditional machining)

### *3.1.1. Uvod*

U ovoj podskupini nekonvencionalnih postupaka se samo jedna obrada koristi za odvajanje materijala s obratka. Mogu se podijeliti prema izvoru energije kojim se ostvaruje obrada na: mehaničke, toplinske, kemijske i elektrokemijske. [22]

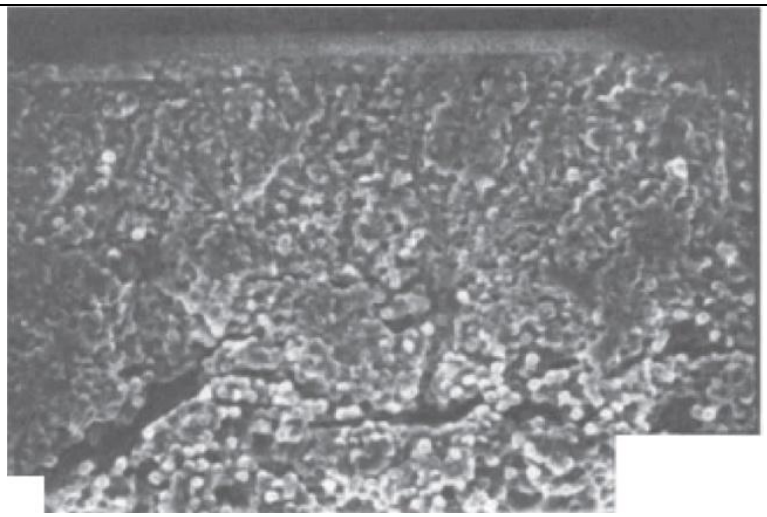
### *3.1.2. Mehanički postupci*

#### *3.1.2.1. Obrada vodenim mlazom (Water jet machining, WJM) i abrazivnim vodenim mlazom (Abrasive water jet machining, AWJM)*

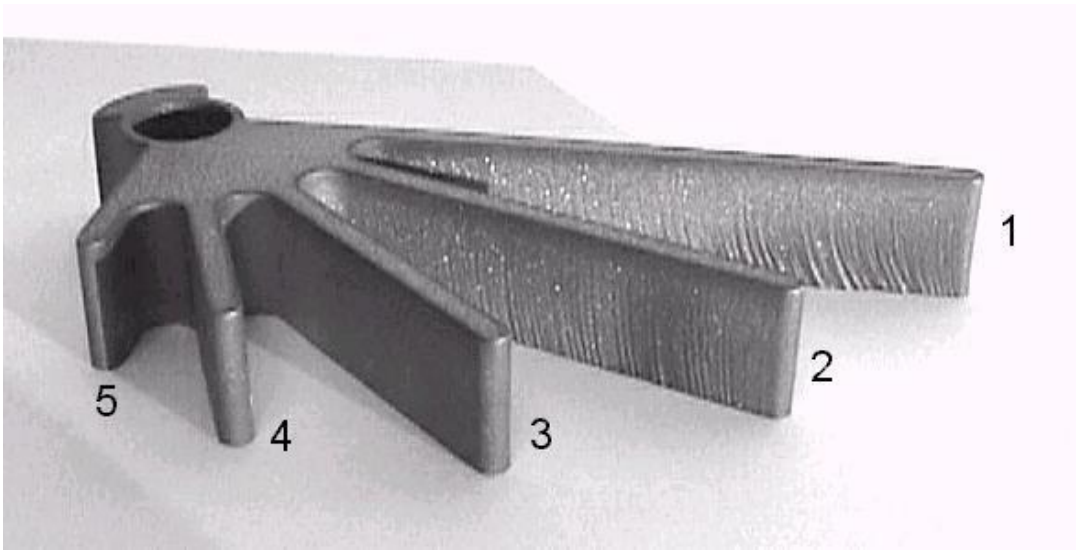
Kod obrade vodenim mlazom odvajanje se postiže djelovanjem vodenog mlaza koji ima brzinu otprilike 900 m/s. Mlaz koji obično djeluje pod tlakom od 4000-5000 bara (može i do 14000 bara) udara u površinu obratka, djelujući kao pila. Materijali koji se mogu rezati su plastika, guma, tkanina, drvo, papir, cigla, kompoziti itd. Kod ovakve obrade početak rezanja može biti proizvoljan (u odnosu na elektroerozijsku obradu žicom kod koje se prvotno mora napraviti provrt), ne razvija se toplina, ne dolazi do iskrivljenja obratka, nastaje minimalna količina srha i proces je ekološki prihvatljiv. [18]

Ako se u vodeni mlaz doda abraziv (silicijev karbid – SiC, aluminijev oksid – $Al_2O_3$), dobije se obrada abrazivnim vodenim mlazom. Količina odvojenih čestica se značajno povećava dodavanjem abraziva. Ovim postupkom mogu se rezati nemetalni, metalni i kompozitni materijali različitih debljina, a posebno je pogodan za materijale koji su osjetljivi na toplinu. Zbog malih posmičnih brzina ne mogu se postići velike proizvodne količine. Na sljedećoj slici (Slika 31) se može primijetiti utjecaj povećanja brzine rezanja na kvalitetu obrađene površine (površine označene brojevima, imaju različite dužine, a obrađivane su približno jednako vrijeme, odnosno površina 1 je imala najveću brzinu rezanja). [18]

Provedena su istraživanja u kojem je kompozitni materijal (epoksidna matrica i jednoliko usmjerena grafitna vlakna) obrađen abrazivnim vodenim mlazom. Pokazala su kako orijentacija vlakana značajno utječe na mikromehaničko ponašanje materijala prilikom odvajanja. Kod kompozita s vlaknima koja su se nalazila pod kutom od 90° u odnosu na smjer djelovanja mlaza nije došlo do valovitog traga na površini obrade, do kojeg dolazi uslijed iskrivljenja (moglo bi se opisati i kao zaostajanje) mlaza zbog smanjene energije u odnosu na energiju mlaza na izlazu iz mlaznice (Slika 31). Veliki nedostatak je taj što dolazi do delaminacije kompozita (Slika 30). [23]



**Slika 30 Delaminacija kompozita prilikom obrade abrazivnim vodenim mlazom [23]**



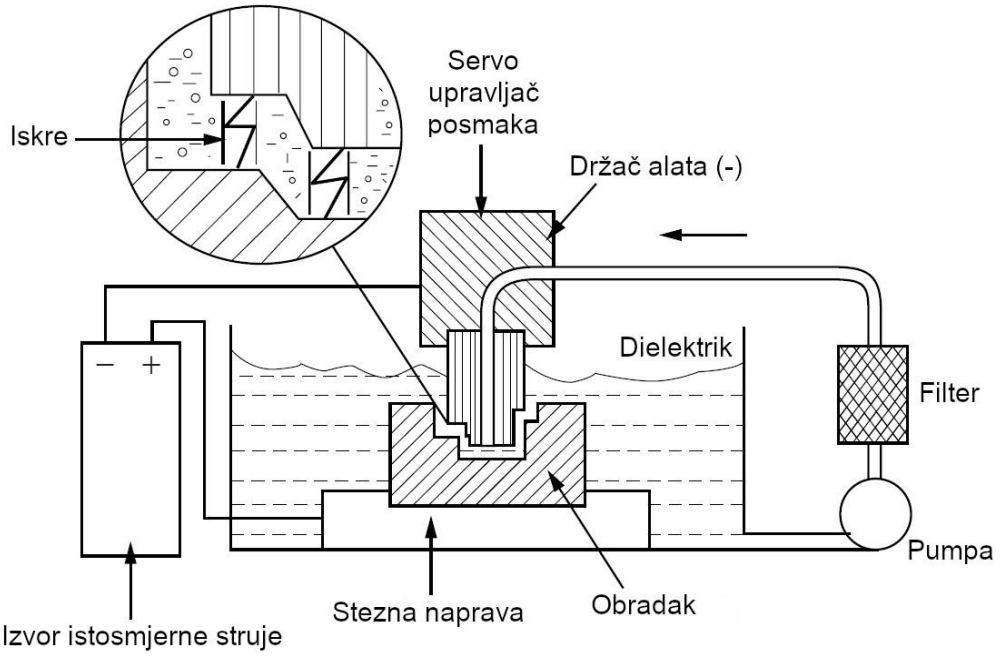

**Slika 31 Primjer valovitog traga na površini obrade vodenim mlazom [25]**

### *3.1.3. Toplinski postupci*

#### *3.1.3.1. Elektroerozijska obrada (Electric discharge machining, EDM)*

Kada se dvije žice koje provode električnu struju dodirnu, dolazi do stvaranja električnog luka i, ako bi se bolje pogledalo, moglo bi se primijetiti kako su na mjestima kontakata nastali mali krateri, tj. došlo je do odvajanja materijala. Ta pojava koristi se kao osnova za elektroerozijski postupak obrade. Sustav se sastoji od alata spojenog na negativan pol izvora istosmjerne (DC) struje (katoda), obratka spojenog na pozitivan pol (anoda) i dielektrične tekućine koja ne provodi električnu struju. Kada je razlika potencijala električne energije alata i obratka dovoljno velika, dolazi do preskakanja iskre uslijed čega se razvija velika količina

topline, materijal obratka se topi i isparava te se pomoću dielektrika odnosi iz zone obrade. [18]

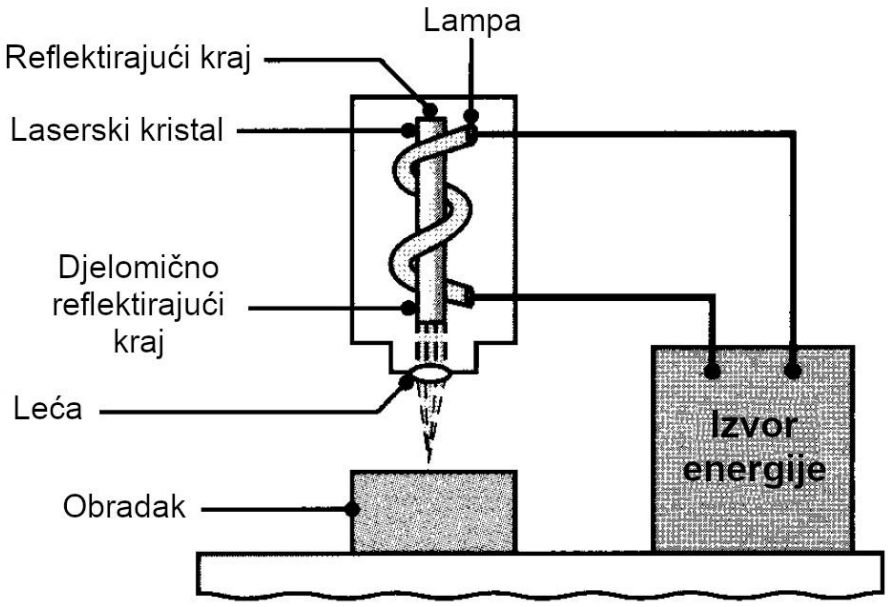



**Slika 32 Elektroerozijski postupak [22]**

Primjenjiv je za teškoobradive (tvrdi metal, kaljeni čelik) i električki vodljive materijale, kompleksne oblike površina (alati, dijelovi turbina, ...). [25] Napredni materijali koji se obrađuju elektroerozijom: kompoziti s metalnom matricom (AlSi7 Mg/SiC i AlSi7 Mg/$Al_2O_3$), kompoziti TiN/$Si_3N_4$, te razne električki vodljive keramike (kobaltom vezan volframov karbid – WC – Co) itd. [23]

### *3.1.3.2. Laserska obrada (Laser machining)*

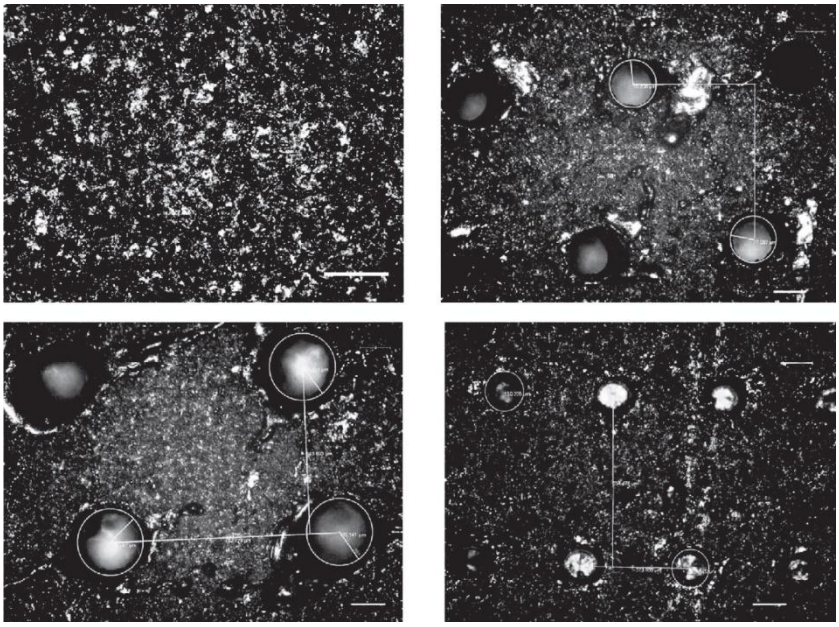
Pojam laser nastao je kao akronim engleskih riječi Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, a kada se prevedu na hrvatski, to je pojačanje svjetlosti s pomoću stimulirane emisije zračenja. [13] Laserska tehnologija se u obradi odvajanjem koristi tako da se laser kao izvor optičke energije usmjeri u neku točku na obratku gdje se materijal kontrolirano tali i isparava. Obrada je to učinkovitija što je manja reflektivnost i toplinska provodnost materijala. Laser može biti $CO_2$, diodni i sl., a koristi se za, npr. bušenje, rezanje metala, nemetala, keramike i kompozitnih materijala. [18]




**Slika 33 Laserska obrada [18]**

Također se koristi za obradu biomaterijala. Biomaterijali su umjetni materijali koji se koriste za izradu zamjenskih dijelova ljudskog tijela ili dijelova koji služe kao pomoć ostvarivanju neke funkcije tijela. Primjeri biomaterijala koji se obrađuju laserom:

- Ti6Al4V – laserom su se izradile različite površinske teksture kako bi se promatrao utjecaj teksture na rast stanica

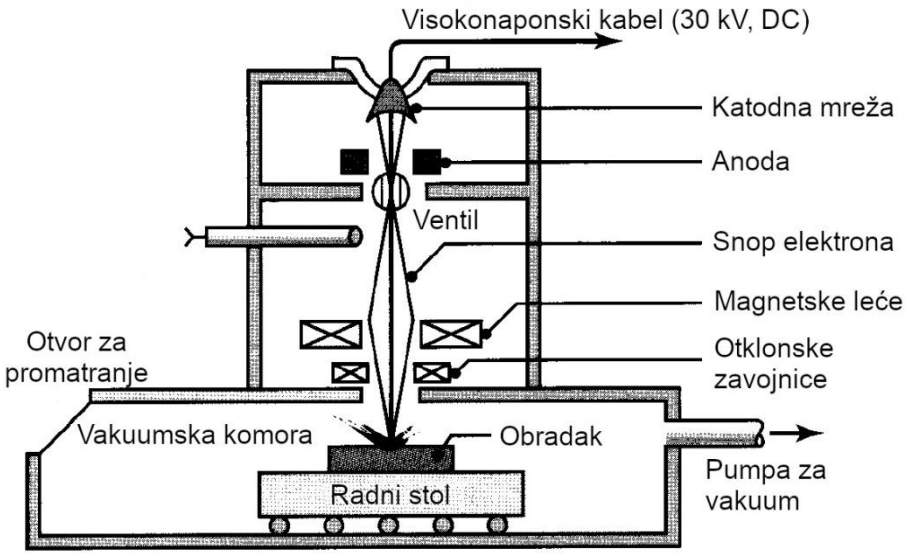


**Slika 34 Različite teksture površine Ti6Al4V dobivene laserskom obradom [23]**

- HA (hydroxyapatite) keramika (vrsta keramike koja se koristi za izradu umjetnih kostiju) – promatrani parametri rezanja i rezultati rezanja [23]

### *3.1.3.3. Obrada snopom elektrona (Electron beam machining)*

Toplina se kod ove vrste obrade stvara udaranjem elektrona koji se gibaju velikim brzinama o površinu obratka. Brzina elektrona iznosi 50 do 80% brzine svjetlosti, $c = 299\,792\,458\,m/s$ [13]. Cijeli proces se mora odvijati u vakuumu. [18]

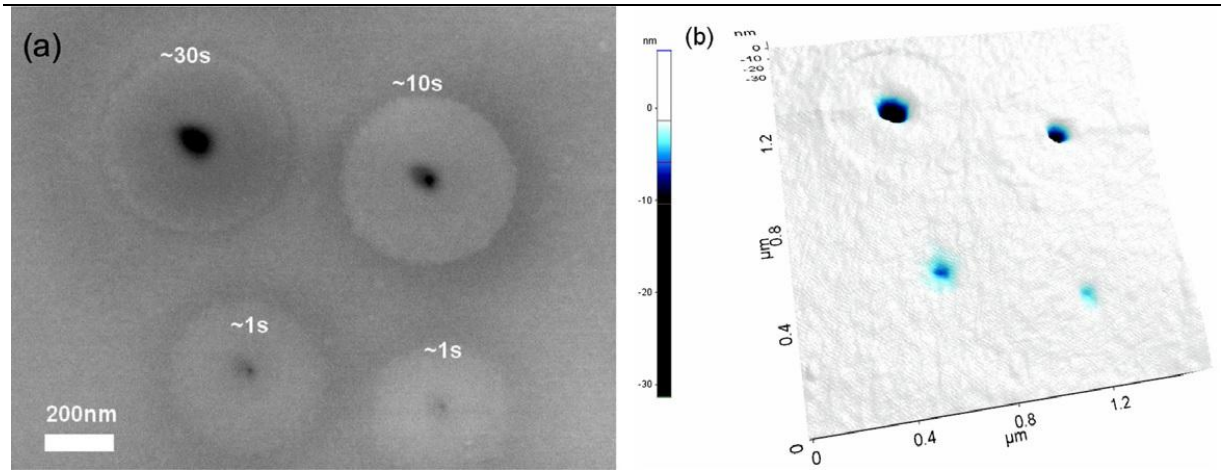



**Slika 35 Postupak obrade snopom elektrona [18]**

Postupkom se dobivaju najbolje kvalitete površine u odnosu na one dobivene ostalim toplinskim postupcima, nema ograničenja što se tiče tvrdoće, čvrstoće ili reflektivnosti obratka, ali je veličina obratka ograničena veličinom vakuumske komore u kojoj se odvija obrada, zahtjeva velika novčana ulaganja i vrijeme obrade je dugo zbog dodatnog vremena potrebnog da se osigura vakuum. [22]

Ova se metoda koristi za:

- obradu keramičkih mikročipova [23]
- izradu nano pora (veličina: $\leq 5 - 20\,nm$) koje se koriste za otkrivanje DNK/RNK i određivanje njihovih struktura (sequencing) [26]




**Slika 36 Nano pore – dobivene različitim vremenom djelovanja elektronskog snopa [26]**

### *3.1.4. Elektrokemijski postupci*

#### *3.1.4.1. Elektrokemijska obrada (Electrochemical machining, ECM)*

Kod elektrokemijske obrade odvajanje materijala se temelji na kemijskoj reakciji elektrolize, a sustav se sastoji od elektrolita, obratka spojenog na pozitivan pol izvora istosmjerne (DC) struje (anoda) i alata (od bakra, bronce, nehrđajućeg čelika) spojenog na negativan pol (katoda). Elektrolit (npr. otopina NaCl-a u vodi) u kojeg su uronjeni alat i obradak, provodi struju i omogućuje otapanje metalnih kationa obratka uslijed elektrolize i njihovo odnošenje pomoću cirkulirajućeg elektrolita prije nego se natalože na alat, tj. negativno nabijenu katodu (Slika 37). Na obratku nastaje površina koja je „negativ“ površine na alatu. Koliko će se metalnih kationa otopiti u elektrolitu, definira Faraday-ev zakon koji kaže da je količina proporcionalna jakosti struje i vremenu trajanja elektrolize. [18]

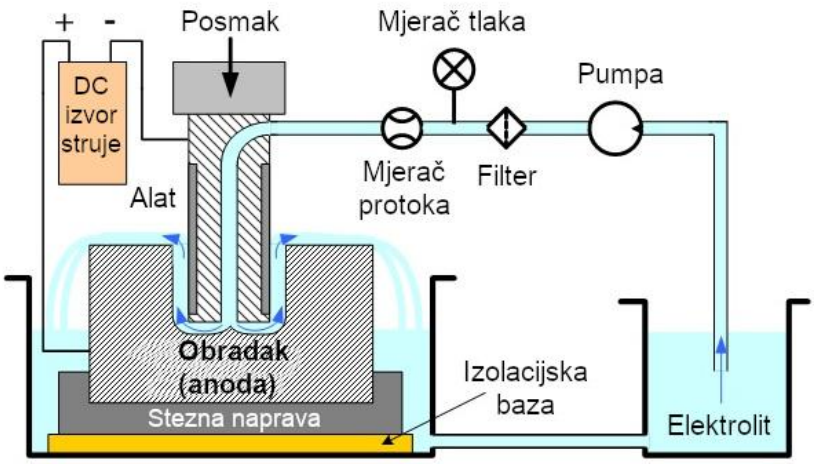
Glavne karakteristike elektrokemijske obrade proizlaze iz mehanizma odvajanja – elektrolize. Nije potrebno djelovati silom na obradak niti je alat u kontaktu s obratkom iz čega slijedi da nema trošenja alata i da se mogu obrađivati tankostjeni profili, produktivnost obrade ne ovisi o mehaničkim svojstvima obratka i mogu se obrađivati materijali visoke tvrdoće. Također proizlazi i ograničenost obrade na materijale koji provode električnu struju.

Prednosti [25]:

- visoka proizvodnost
- nema zaostalih naprezanja niti stvaranja srha
- visoka kvaliteta površine ($R_a$ =0,1 – 2,5 μm)
- dimenzijska točnost izratka 0,02 – 0,2 mm
- nema trošenja alata

Nedostaci [25]:

- skupa oprema i velika potrošnja energije
- samo materijali koji provode električnu struju (nije pogodan za obradu naprednih materijala, npr. keramika – ne provodi električnu energiju [23])
- elektrolit može imati korozivno djelovanje
- ekološki štetan postupak

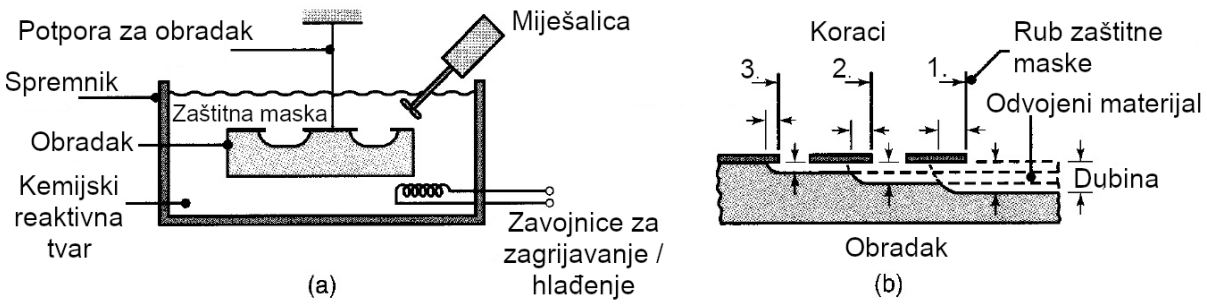



**Slika 37 Prikaz elektrokemijske obrade (ECM) [25]**

### *3.1.5. Kemijski postupci*

#### *3.1.5.1. Kemijska obrada (Chemical machining)*

Kemijska obrada je najstarija od naprednih obradnih procesa i nastala je iz spoznaje da kemikalije agresivno djeluju na materijale kao što su metali, kamen i neke keramike i tim djelovanjem uklanjaju malu količinu materijala s površine obratka. Postupak se provodi pomoću otopljenih reaktivnih tvari – mogu biti kiseline ili lužine, koje djeluju na površine koje nisu zaštićene, tzv. zaštitnim maskama (Slika 38). Maske mogu biti u obliku traka ili boje, ali i razni elastomeri i plastomeri koji ne reagiraju s otopinom. Uslijed otežane obrade poroznih obradaka, oštrih bridova i dubinskih obrada, koristi se za graviranje metala, kamena i slične površinske obrade. Primjenjuje se i pri obradi površina mikro-elektro-mehaničkih sustava (MEMS) i poluvodiča. [18]



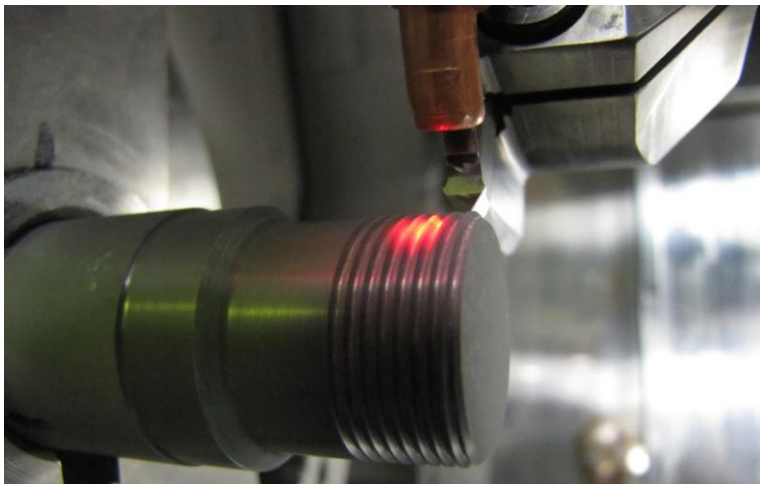

**Slika 38 Prikaz postupka i koraka kemijske obrade [18]**

## 3.2. Hibridni postupci (Hybrid machining)

### *3.2.1. Uvod*

Nedostaci pojedinačnih nekonvencionalnih obrada kao što su: ograničenost elektrokemijskih i elektroerozijskih obrada na električki vodljive materijale, negativan utjecaj toplinskih obrada odvajanjem u obliku rekristalizacije, degradacije tvrdoće itd., su, između ostalog, doveli do razvoja novih proizvodnih postupaka pod nazivom hibridni proizvodni postupci. Ako bi se pojam hibridni postupci zadržalo u području proizvodnih tehnologija, on bi općenito označavao postupke u kojima se spajaju i koriste različite vrste obrada. Cilj spajanja obrada je „1 + 1 = 3“ efekt, odnosno postići da su prednosti hibridnog postupka veće od samog zbroja prednosti postupaka od kojih se sastoji (kada bi se oni odvijali zasebno). [27]

Kao primjer se navodi postupak tokarenja potpomognutog laserom (Slika 39). Prednost takvog postupka očituje se kod, npr. obrade materijala izrazito visoke tvrdoće kao što je keramika. Postavljanjem laserske zrake ispred reznog alata dolazi do omekšanja keramike netom prije kontakta s reznim alatom čime se olakšava obrada. [28]



**Slika 39 Tokarenje potpomognuto laserom [28]**

Obrada materijala vrlo visoke tvrdoće jedan je primjer mnogobrojnih izazova s kojima se suočava suvremena proizvodnja – materijali povišene čvrstoće, materijali otporni na visokim temperaturama i sl.. Jedan od izazova pred proizvodnju postavlja i zrakoplovna industrija čiji razvitak obuhvaća i razvitak novih, nepoznatih varijacija materijala kao što su – legure, keramike, kompoziti. [8]

### *3.2.2. Definicija i karakteristike hibridnih postupaka*

Precizniju definiciju hibridnih postupaka ponudila je CIRP[2] – ova suradnička radna grupa za hibridne postupke i ona glasi:

„Hibridni proizvodni postupci se temelje na simultanoj i kontroliranoj interakciji mehanizama obrade i/ili izvora energije/alata koja ima značajan utjecaj na značajke postupka.“.

„Simultana i kontrolirana interakcija“ odnosi se na to da bi sve obrade/izvori energije trebali djelovati u približno istoj zoni obrade i u približno isto vrijeme. Kao rezultat toga se postiže smanjeno trošenje rezne oštrice alata, smanjenje sila koje se javljaju prilikom obrade, poboljšanje integriteta površine obratka, povećanje produktivnosti itd. [8] Dakle hibridizacijom se nastoje ostvariti povoljniji uvjeti za obradu teško obradivih materijala, kompleksnih geometrija ili zahtjevnih veličina uz postizanje zadovoljavajuće kvalitete, točnosti, produktivnosti i ekonomičnosti obrade.

Mogu se podijeliti na:

a) procese kod kojih su svi sudjelujući procesi izravno uključeni u odvajanje materijala
b) procese u kojima samo jedan proces izravno sudjeluje u odvajanju materijala (primarni proces), a drugi proces potpomaže odvajanje materijala stvarajući povoljnije uvjete obrade (sekundarni proces).

### *3.2.3. Miješani hibridni procesi (Mixed or combined hybrid processes)*

Prema [8] i [27] procesi kod kojih su svi sudjelujući procesi izravno uključeni u odvajanje materijala nazivaju se miješani ili kombinirani hibridni procesi. Prema [27] oni se mogu podijeliti na elektrokemijske i toplinske hibridne procese.

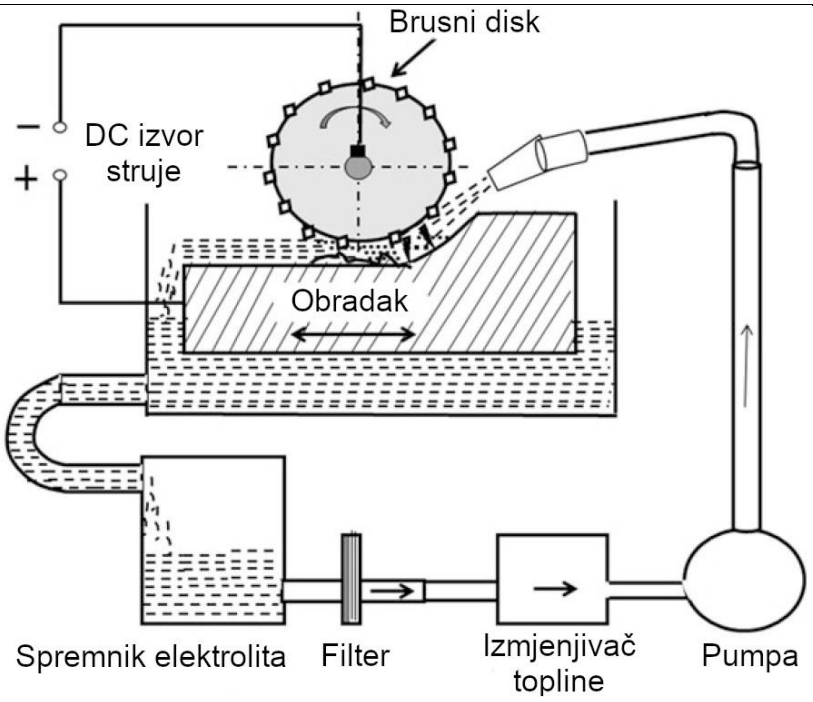
[2] CIRP - Collège International pour la Recherche en Productique (*eng.* The International Academy for Production Engineering)

Elektrokemijski hibridni procesi nastaju kombiniranjem elektrokemijske obrade (ECM) s konvencionalnim postupcima za završnu obradu. Uz mnoge prednosti elektrokemijske obrade (neovisnost postupka o mehaničkim svojstvima obratka kao što su tvrdoća ili čvrstoća, dobra kvaliteta i integritet površine, visoka proizvodnost) postoje i značajni nedostaci: uslijed stvaranja kisika na anodi dolazi do pasivacije, tj. stvaranja pasivnog metalnog sloja na obratku koji ne provodi električnu struju, točnost ovisi o razmaku između elektroda što zahtjeva dobro odvođenje odvojenih čestica pomoću elektrolita itd. Spajanjem ECM postupka s konvencionalnim dobiva se čišćenje pasivnog sloja s površine obratka, održavanje efektivnog razmaka između elektroda, uklanjanje topline i odvojenih čestica iz zone rezanja. Isto tako je manje trošenje brusnog alata i oštećivanje površine obratka. [27]

Kod toplinskih hibridnih procesa je elektroerozijska obrada (EDM) primaran proces odvajanja koji se kombinira s konvencionalnim ili elektrokemijskim postupkom (ECM). Kako je elektroerozija primaran proces, odvajanje se vrši serijama električnih impulsa ili iskrenja uslijed kojih se razvija velika količina topline i dolazi do taljenja i isparavanja materijala. Zbog toga ovi hibridni procesi nose naziv toplinski. [27] Toplinskim hibridnim postupcima mogu se postići hrapavosti do 0,1 μm i 2 – 3 puta veće produktivnosti u odnosu na pojedinačne procese od kojih se sastoje, uz odličnu kvalitetu obradaka. [27]
Slijede primjeri takvih postupaka.

#### *3.2.3.1. Elektrokemijski procesi - elektrokemijska obrada i brušenje (ECM and grinding)*

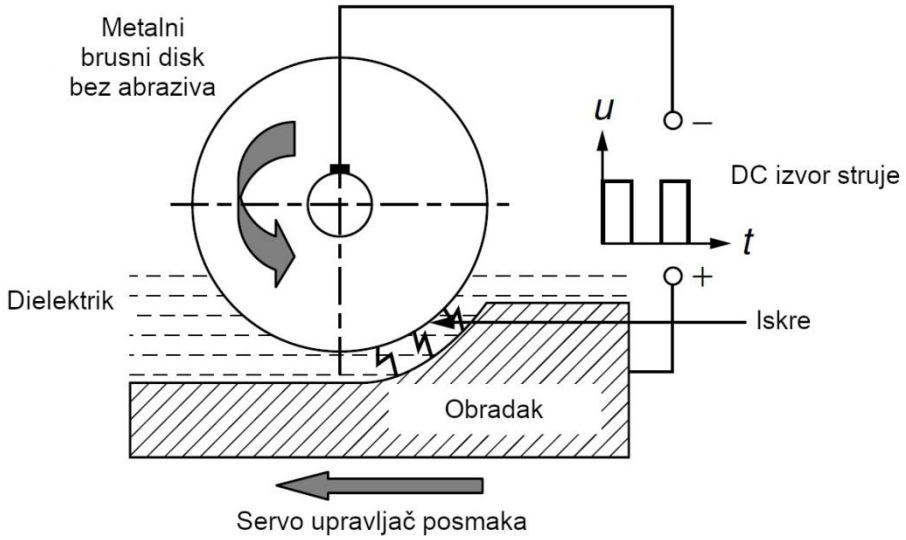
S obzirom na visoke cijene obrade teškoobradivih materijala, konvencionalni postupci kao što je brušenje dijamantom, nastoje se zamijeniti hibridnim procesima. Primjer takvog procesa je elektrokemijsko brušenje. Kao rezultat se dobiva površina bez srha, bez zone utjecaja topline (ZUT) i bez zaostalog naprezanja, a vijek trajanja brusnog alata se značajno produžuje.
Tijekom procesa je brusni disk s metalnim vezivom spojen na izvor istosmjerne struje kao katoda (negativan pol – privlači katione), a obradak je spojen kao anoda (pozitivan pol – privlači anione). Samo brušenje se odvija uz tok elektrolita koji hladi obradak i odvodi odvojene čestice, a brusna zrna održavaju efektivni razmak između elektroda te uklanjaju eventualno nastali pasivni sloj (npr. oksid). Elektrokemijskim reakcijama se odvaja otprilike 95% materijala, preostalih 5% brušenjem. [27]




**Slika 40 Prikaz elektrokemijskog brušenja [27]**

*3.2.3.2. Toplinski procesi – elektroerozijsko brušenje (Electric discharge grinding)*

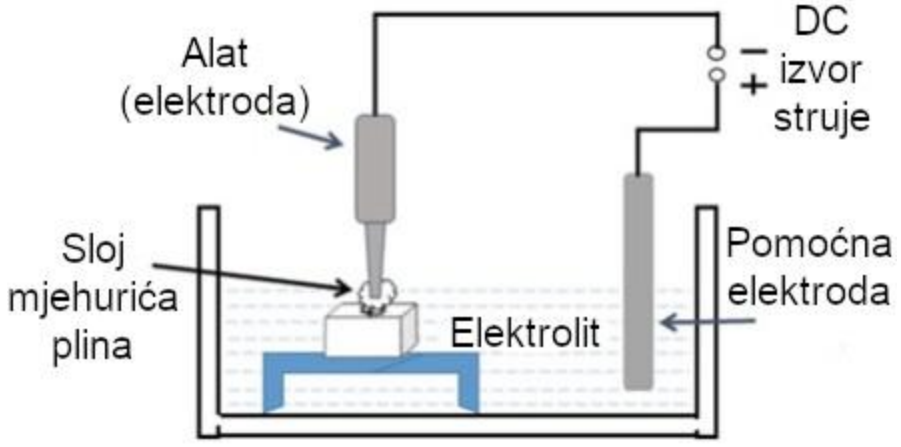
Proces je namijenjen za obradu teškoobradivih, tvrdih i krhkih materijala koji provode električnu struju. Sustav se sastoji od brusnog diska bez abraziva izrađenog od električki vodljivog materijala, koji je na izvor istosmjerne struje spojen kao katoda (negativan pol), obratka spojenog na pozitivan pol (anoda), dielektrika, servo sustava i izvora struje. Obodna brzina brusnog diska je između 30 i 180 m/min, u prostoru između elektroda (10 – 75 μm) dolazi do iskrenja uslijed pulsirajućeg djelovanja električne struje. Materijal se tali i isparava nakon čega se strujom dielektrika, koju stvara rotirajući brusni disk, odvode odvojene čestice iz zone obrade. Zbog efikasnijeg odvođenja čestica, veća je učinkovitost obrade, također se postiže manja površinska hrapavost (0,2 μm) i veća dimenzijska točnost ($\pm$ 2,5 μm) u odnosu na pojedinačne procese od kojih se sastoji. Koristi se za obradu polikristaličnog dijamanta (PCD), kompozita s metalnom matricom i tankih, krhkih električki vodljivih obradaka (omogućeno jer nema kontakta između alata i obratka). [27]




**Slika 41 Prikaz elektroerozijskog brušenja [27]**

*3.2.3.3. Toplinski procesi - elektroerozijska obrada i elektrokemijska obrada (Electrochemical discharge machining, ECDM)*

U kombinaciji elektrokemijske i elektroerozijske obrade, do odvajanja materijala dolazi uslijed složene kombinacije elektrolize i iskrenja. Između alata (katode) i pomoćne elektrode (anode) uronjenih u elektrolit, dolazi do elektrolize kojom se na alatu (katodi) stvaraju mjehurići plina (vodika, $H_2$) koji čine izolacijski sloj između elektrode i elektrolita. Primjenom istosmjerne struje dolazi do rastvaranja izolacijskog sloja i iskrenja između alata i obratka. Iskrenje uzrokuje taljenje i isparavanje materijala. Miješanje tih procesa rezultira manjom hrapavosti površine, manjim trošenjem alata i većom učinkovitošću. [27], [29]




**Slika 42 Prikaz kombinacije elektroerozijskog i elektrokemijskog postupka [27]**

### *3.2.4. Potpomognuti hibridni procesi (Assisted hybrid processes)*

Potpomognuti hibridni proces se sastoji od primarnog i sekundarnog procesa. Primarni je onaj kojim se odvaja materijal, dok je zadaća sekundarnog procesa da ostvari povoljnije uvjete obrade. Prema [8], najvažniji pomoćni ili sekundarni procesi su: vibracija, laser (toplina) i medij. Također se mogu koristiti abrazivi, magnetsko polje i sl.

U nastavku će se dati pregled karakteristika i primjene najvažnijih sekundarnih procesa kod konvencionalnih i nekonvencionalnih obrada.

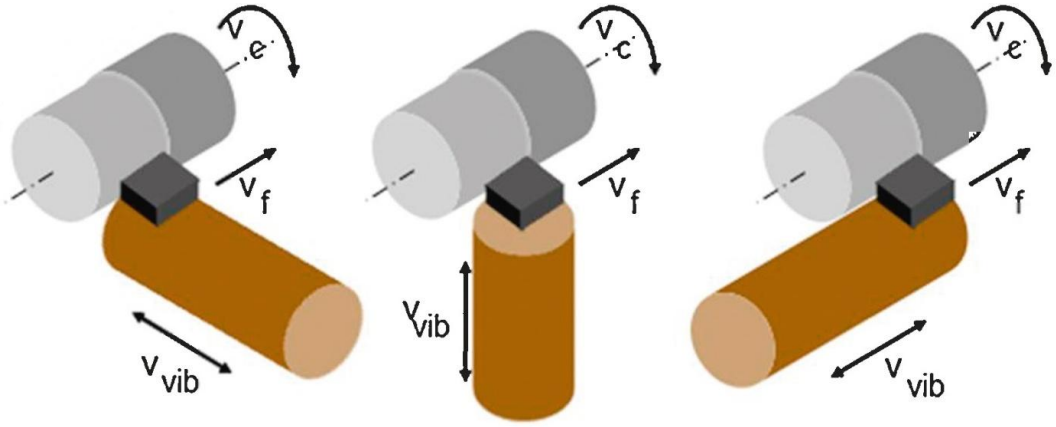
#### *3.2.4.1. Obrada potpomognuta vibracijom*

Vibracija se kao sekundarni proces koristi kod mnogih postupaka kako bi se poboljšalo odvajanje materijala. Ostvaruje se pomoću piezoelektričnih elemenata integriranih u glavno vreteno, držač alata ili u napravu za stezanje obratka. Amplitude vibracije se najčešće kreću od 1 do 200 μm, a frekvencije od 0,1 kHz do 80 kHz. S obzirom na to da se pojave s frekvencijom većom od gornje granice osjetljivosti čovječjeg uha – 20 kHz, nazivaju ultrazvučne [13], često se umjesto obrade potpomognute vibracijom koristi naziv obrade potpomognute ultrazvukom (ultrasonic assisted machining). [8]

**Konvencionalni postupci:**

1. Tokarenje potpomognuto vibracijom (Vibration assisted turning)

Vibracija može biti: u radijalnom smjeru (Slika 43, lijevo), u smjeru glavnog gibanja (Slika 43, sredina; glavno gibanje je rotacija obratka, stoga je glavna brzina rezanja, $v_c$ jednaka obodnoj brzini obratka) i u smjeru posmičnog gibanja (Slika 43, desno; posmično gibanje je linearno gibanje alata za tokarenje duž osi rotacije obratka, stoga se brzina tog gibanja naziva posmična brzina, $v_f$). [8]




**Slika 43 Djelovanje vibracije prilikom tokarenja u: radijalnom smjeru (lijevo), smjeru glavne brzine (sredina) i posmične brzine (desno) [8]**

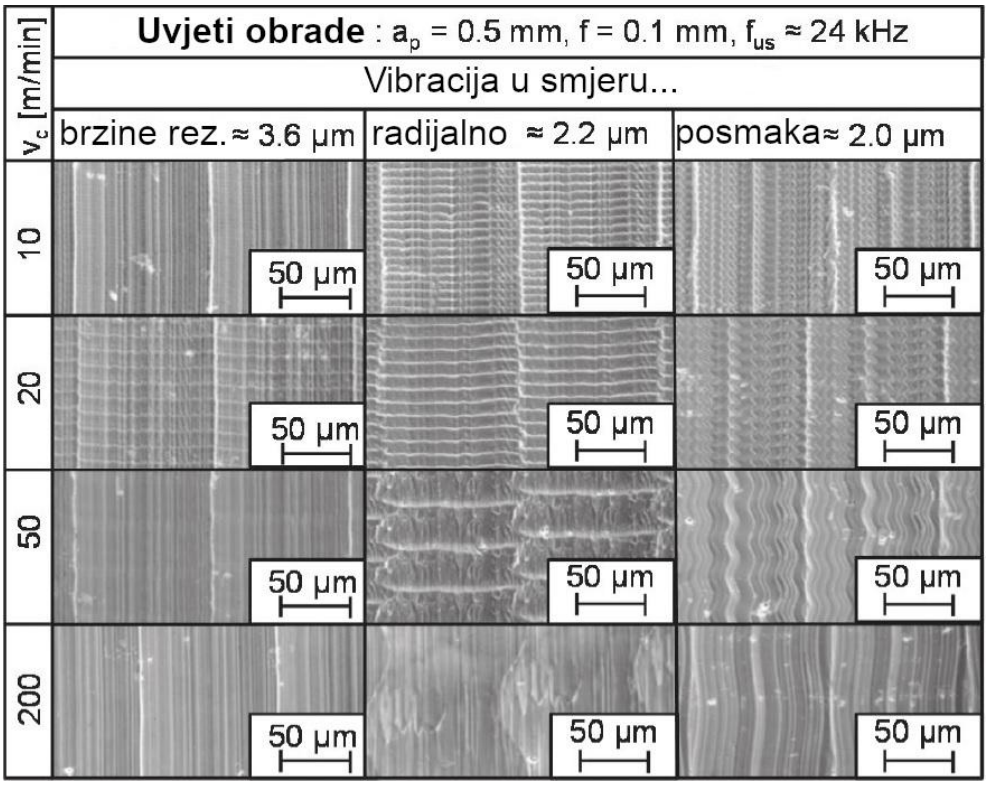
Najčešći je **smjer glavne brzine rezanja**. Rezultantna glavna brzina rezanja može se izračunati prema jednadžbi (1):

$$v_{c,res}(t) = v_c + A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad \textbf{(1)}$$

dok se kutna brzina računa prema (2):

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{us} \quad \textbf{(2)}$$

Proučavanjem obrađene površine legure aluminija ispod elektronskog mikroskopa [30] se pokazalo da se obradom uz takav smjer vibracije dobiva mala razlika u površinskoj strukturi i jednaki iznosi hrapavosti u usporedbi s obradom bez vibracija (Slika 44, prvi stupac).




**Slika 44 Površinske strukture dobivene tokarenjem uz vibraciju: u smjeru glavne brzine rezanja (1. slikovni stupac), u radijalnom smjeru (2. slikovni stupac) i u smjeru posmičnog gibanja (3. slikovni stupac) [8]**

Ako se radi o **radijalnom smjeru vibracije**, dolazi do promjene dubine rezanja koja se može prikazati jednadžbom:

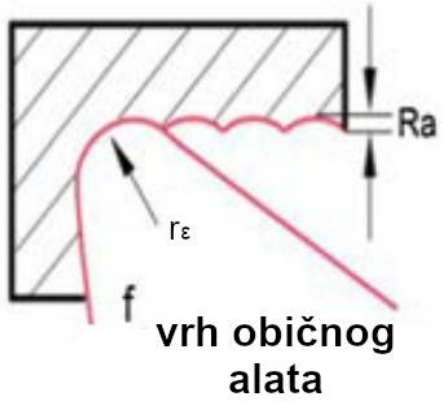
$$a_{p,res}(t) = a_p + A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \textbf{(3)}$$

Zbog promjenjive dubine rezanja dolazi do stvaranja odgovarajuće, specifične površinske strukture (Slika 44, srednji stupac). Geometrija te površinske strukture ovisi o: posmaku (f), amplitudi vibracije (A) i odnosu između brzine rezanja ($v_c$) i frekvencije vibracije ($f_{us}$) koji se

još definira kao dimenzija površinske strukture u smjeru promjera ($d_c$), a računa se prema jednadžbi (4):

$$d_c = \frac{v_c}{f_{us}} \quad \textbf{(4)}$$

Iz jednadžbe se može vidjeti da se s porastom brzine rezanja, dimenzija $d_c$ linearno mijenja. Pojave koje se također uočavaju prilikom radijalnog smjera djelovanja vibracije su: porast hrapavosti u longitudinalnom smjeru te da aksijalna udaljenost između površinskih struktura odgovara posmaku, odnosno radi se o udaljenosti vrhova neravnina koje nastaju samim tokarenjem.




**Slika 45 Neravnine uzrokovane tokarenjem [20]**

Kod smjera vibracije koji odgovara **smjeru posmičnog gibanja**, javlja se promjena posmaka tijekom obrade prema jednadžbi (5):

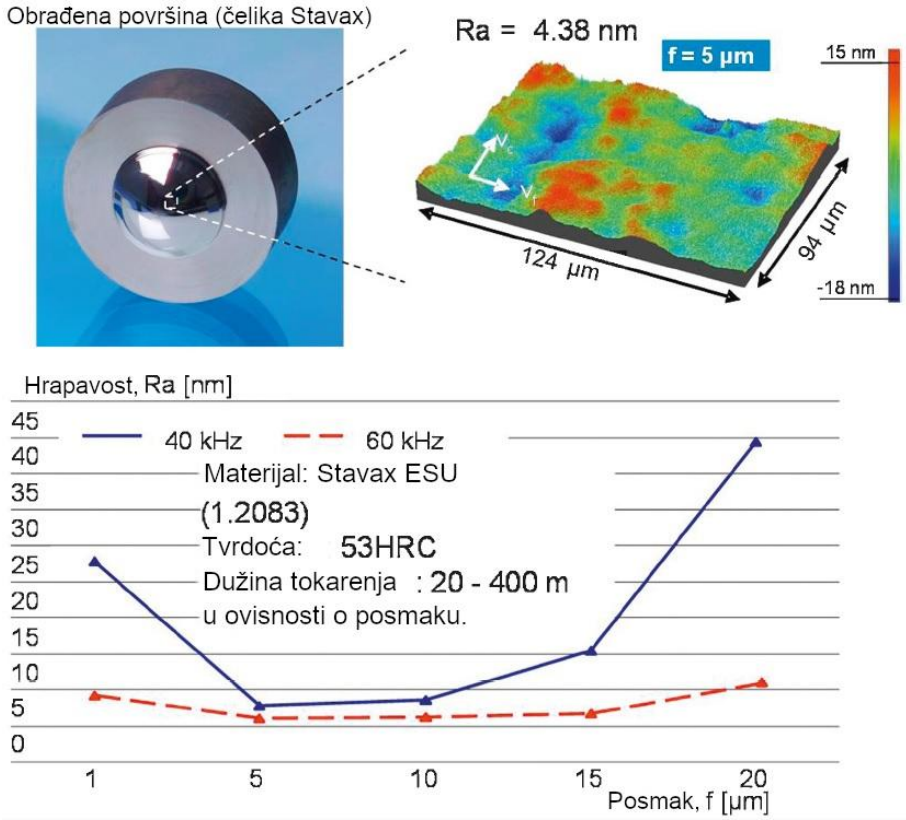
$$f_{res}(t) = f + A \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \textbf{(5)}$$

Kod ovakve izvedbe tokarenja potpomognutog vibracijom nema utjecaja na površinsku hrapavost, ali se stvara valovit izgled površinske strukture obratka (Slika 44, desni stupac), a amplituda tih struktura odgovara amplitudi vibracije reznog alata. Zahvaljujući tome se mogu dobivati razne strukture za različite primjene. Ovaj slučaj se može zamisliti kao da se drži flomaster, giba ga se lijevo – desno (vibracija alata) i prislanja na papir (površina obratka) koji se giba odozgo prema dolje. Kao rezultat, na papiru će ostati valoviti tragovi. Ako se poveća brzina gibanja papira, a gibanje lijevo – desno ostane jednako, valovi će biti „razvučeniji“.

Prednosti tokarenja potpomognutog vibracijom u smjeru glavnog gibanja su korak naprijed za obrade odvajanjem čestica jer omogućuju visokopreciznu obradu materijala kao što su kaljeni čelik, staklo, ostale vrste keramike pomoću mono-kristaličnog dijamanta uz manje sile rezanja

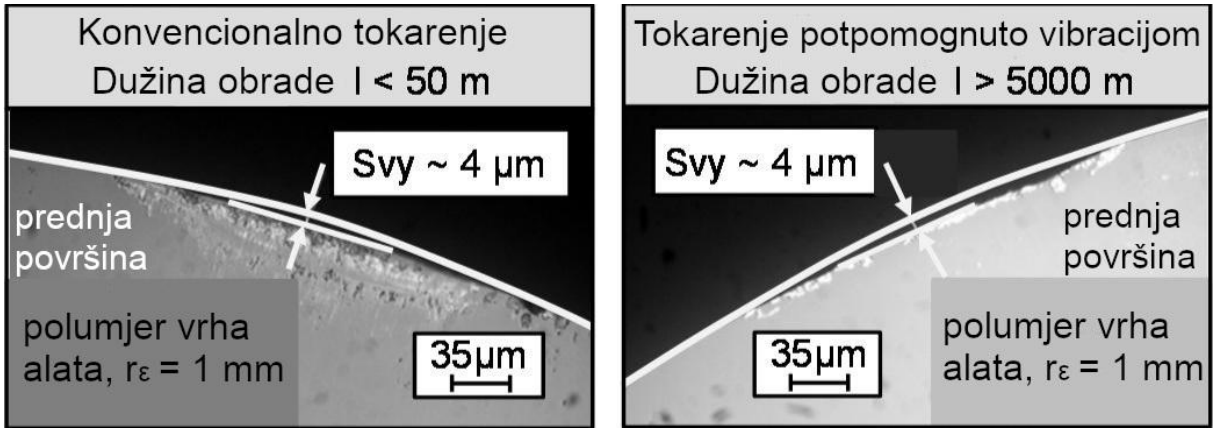
i veću postizivu kvalitetu obrađene površine te geometrijsku točnost. Općenite prednosti primjene vibracije su:

- smanjena je učestalost stvaranja naljepka i srha
- u primjeru na sljedećoj slici (Slika 46) je prikazano kako se višom frekvencijom vibracije može postići bolja površinska kvaliteta. Moguće je postići srednje aritmetičko odstupanje, $R_a$ od samo 0,00438 µm (ili 4,38 nm).



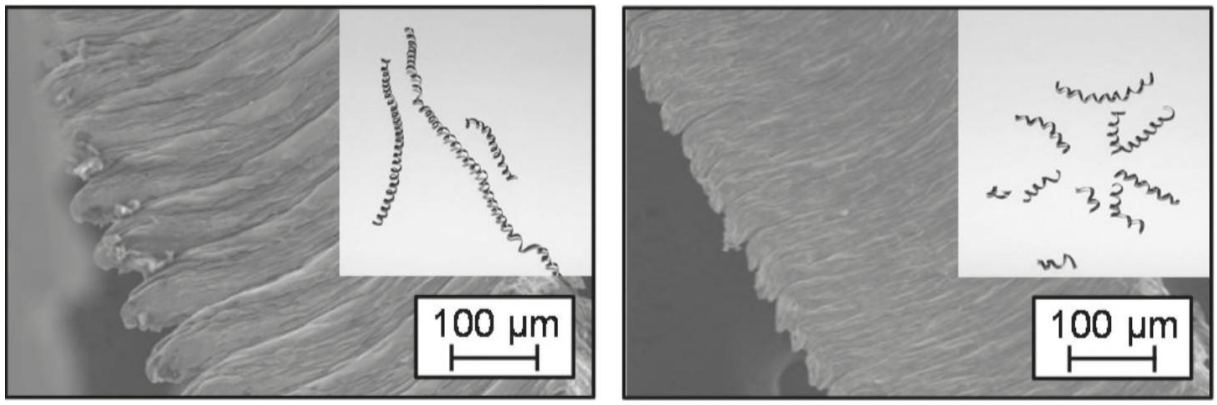

**Slika 46 Dijagram: Ra (hrapavost) – f (posmak), za dva slučaja frekvencija vibracije (tokarenje potpomognuto vibracijom) [8]**

- značajno sniženje trošenja reznog alata – na sljedećoj slici (Slika 47) se može vidjeti kako je kod konvencionalnog tokarenja na dužini obrade manjoj od 50 m parametar trošenja, u iznosu od 4 μm, jednak kao kod tokarenja potpomognutog vibracijom na dužini obrade od 5000 m (čak 100 puta veća dužina obrade u odnosu na konvencionalno tokarenje)




**Slika 47 lijevo: konvencionalno tokarenje i desno: tokarenje potpomognuto vibracijom [8]**

- mogućnost utjecaja na oblik odvojene čestice (može se postići povoljni kratki i nasječeni oblici čestice (Slika 48, desno))



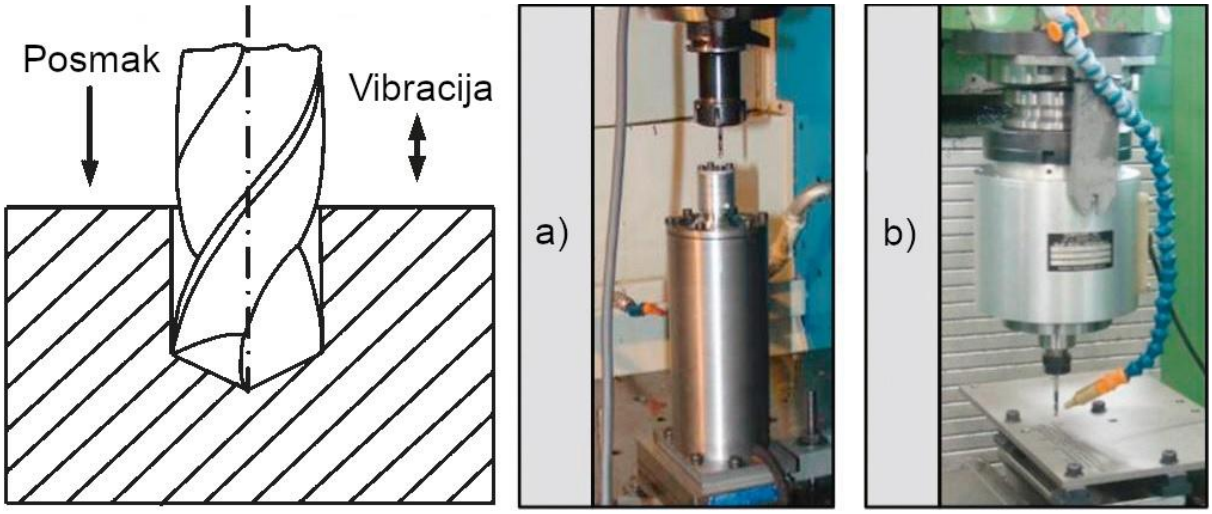

**Slika 48 Oblici odvojene čestice [8]**

Zbog tih važnih prednosti su sustavi za tokarenje potpomognuto vibracijom dostupni na tržištu i mogu se implementirati na konvencionalne alatne strojeve (Slika 49, lijevo). [8]

**Slika 49 Sustav za tokarenje potpomognuto vibracijom (lijevo), postizive hrapavosti (desno) [8]**

2. Bušenje potpomognuto vibracijom (Vibration assisted drilling)

Vibracija se primjenjuje na alat ili na obradak (Slika 50), čime se ostvaruju manje sile rezanja i bolji lom odvojene čestice.




**Slika 50 Primjena vibracije: a) na obratku, b) na alatu [8]**

Sljedeća istraživanja pokazuju dodatne prednosti:

- obrada materijala Ti6Al4V – prilikom visokih amplituda vibracije, na visokim temperaturama obrade zamijetio se pad posmične sile rezanja za 20% u odnosu na konvencionalno bušenje
- duboko bušenje materijala Inconel 738LC – zabilježene manje sile rezanja, smanjena površinska hrapavost i bolji lom odvojene čestice

- obrada kamena (graniti i mramori) – zabilježeno smanjenje sila, pojave kratera na svrdlu (kratersko trošenje alata)

Slične prednosti su zamijećene kod bušenja kompozita s metalnom matricom i kompozitnog polimera ojačanog karbonskim vlaknima (carbon fibre-reinforced polymer composite, CFRP) [8].

3. Glodanje potpomognuto vibracijom (Vibration assisted milling)

Glodanje potpomognuto vibracijom nema široku primjenu zbog složenosti kinematike, ali su istraživanja pokazala da se zbog mikrostrukture legure aluminija dobivene ovim postupkom postižu bolja tribološka svojstva. Uz to bi trebalo spomenuti i, u odnosu na konvencionalno glodanje, bolju hrapavost površine materijala kao što su nehrđajući čelik i legura titana. [8]

4. Brušenje potpomognuto vibracijom (Vibration assisted grinding)

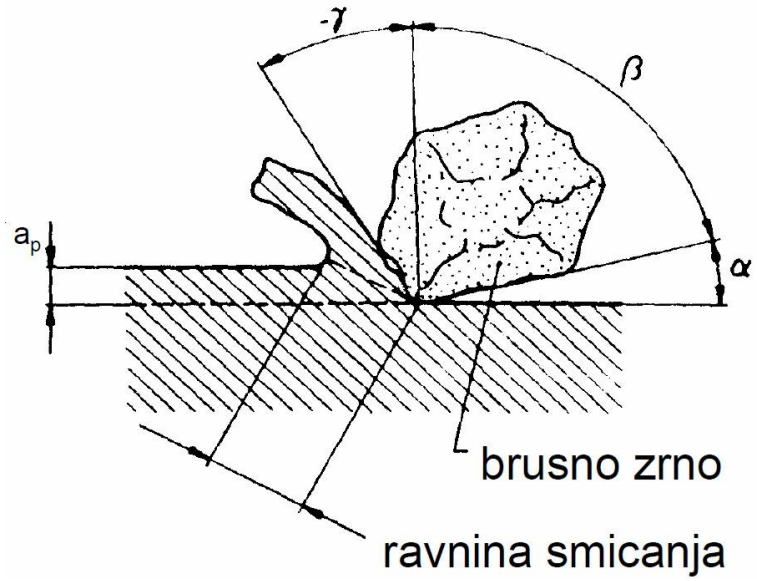
Najpoznatiji proces koji predstavlja ovakvu obradu je u literaturi poznat kao „Rotary Ultrasonic Assisted Grinding“ (RUAG), prilikom kojeg se primjenjuju dijamantni alati za brušenje s metalnim vezivom. Obrada se često izvodi na 3-osnoj ili 5-osnoj CNC glodalici, a vibracija se može primijeniti na glavno vreteno, držač reznog alata ili na obradak.

Ako se govori o slučaju gdje je vibracija primijenjena na rezni alat (na držač alata ili glavno vreteno), njezino djelovanje na površinu obratka ovisi i o vrsti brušenja – bočno (stranično) ili obodno.

Ako se radi o straničnom, vibracija u smjeru Z-osi uzrokovat će djelovanje alata nalik udarnom, dok će kod obodnog uzrokovati valovito, tj. sinusoidno djelovanje brusnog alata na površinu koja se obrađuje jer će brus “šetati” po Z-osi tijekom rotacije, ostavljajući valovit trag.

Istraživanja pokazuju da se kod straničnog glodanja potpomognutog vibracijom kao posljedica djelovanja vibracije javlja samo-oštrenje alata. Samo-oštrenje alata uzrokuje 10-50% manje sile rezanja, bolju kvalitetu i integritet površine provrta. Zbog navedenih prednosti, postupak se često koristi za obradu prolaznih provrta, stranično brušenje teškoobradivih materijala (npr. keramike i karbidi) i razne 2, $2\frac{1}{2}$ i 3D obrade. Amplituda vibracije bi trebala biti veća od najveće debljine odvojene čestice kako bi se osigurao periodički diskontinuirani kontakt između alata i obratka.

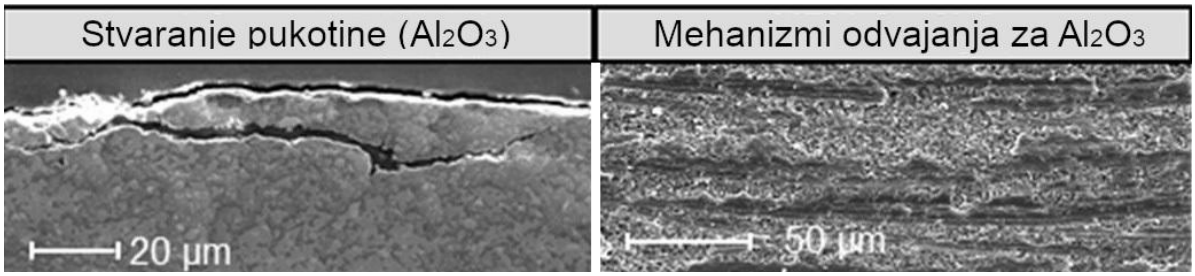
S obzirom na negativnu geometriju brusnih zrna (Slika 51) zbog koje se javlja povećano trenje, provela su se istraživanja na području sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP).




**Slika 51 Geometrija rezne oštrice brusnog zrna [31]**

Pokazala su kako SHIP na bazi ulja smanjuje sile rezanja i to zahvaljujući svojstvu podmazivanja.

Kod obodnog brušenja utora i džepova vibracija, koja ima smjer okomit na smjer posmičnog gibanja, može uzrokovati pukotine na površini okomitoj na površinu koja se obrađuje zbog konstantnog udaranja alata u tu površinu obratka (Slika 52, lijevo). Kod takve obrade tvrdih i krhkih materijala se, prema teksturi obrađene površine (Slika 52, desno), može primijetiti da se javljaju različiti mehanizmi odvajanja čestica – plastična deformacija i krhki lom.

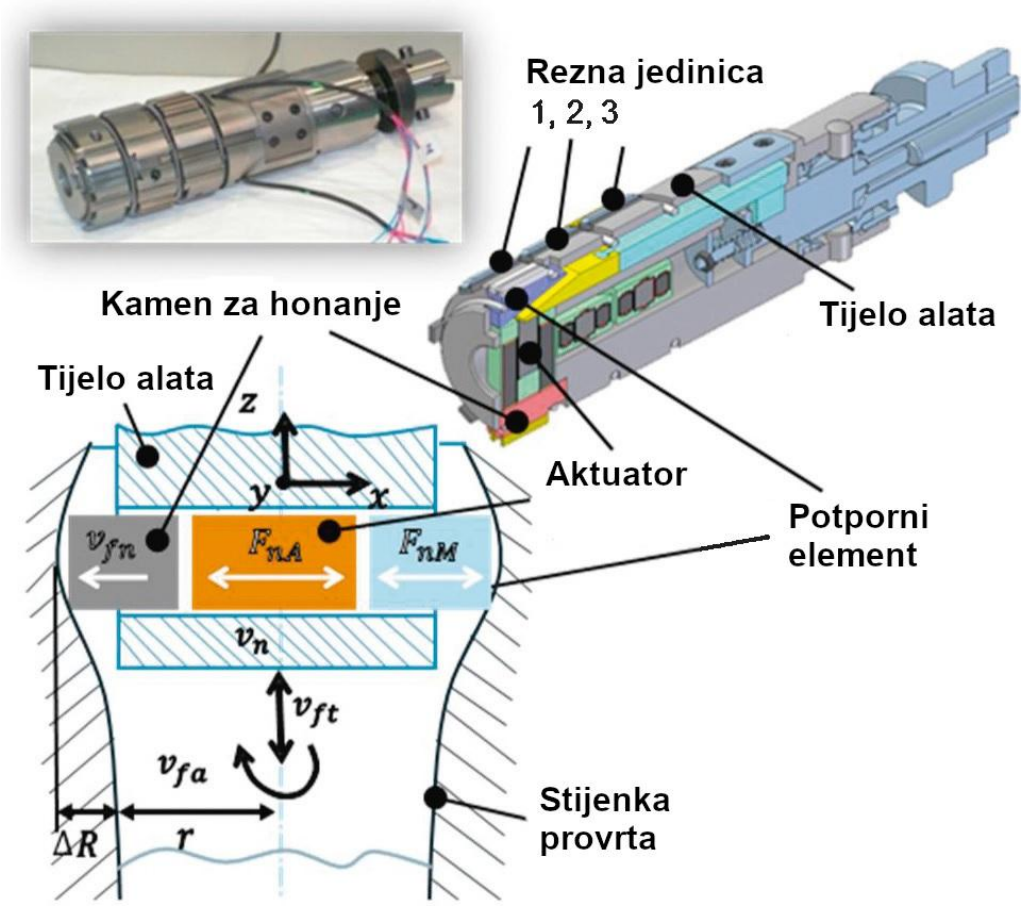



**Slika 52 lijevo: negativni utjecaj vibracija na površinu obratka od $Al_2O_3$ (RUAG postupak) i desno: tekstura površine [8]**

Vrsta mehanizma ovisi o svojstvu materijala, parametrima obrade i amplitudi vibracije. Iako se krhkim lomom povećava učinak brušenja i smanjuju sile rezanja, trebao bi se izbjegavati prilikom završnih obrada. [8]

5. Honanje potpomognuto vibracijom (Vibration assisted honing)

Honanje potpomognuto vibracijom se koristi za završnu obradu u proizvodnji motora s izgaranjem. Za stvaranje vibracija koriste se piezoelektrični elementi, a giba se svaki brusni segment. [8]




**Slika 53 Alat za honanje potpomognuto vibracijom [8]**

Takvo gibanje alata u radijalnom smjeru (vibracija), uz uobičajeno vertikalno i rotacijsko, omogućuje obradu složenijih geometrija provrta kod motora. [8]

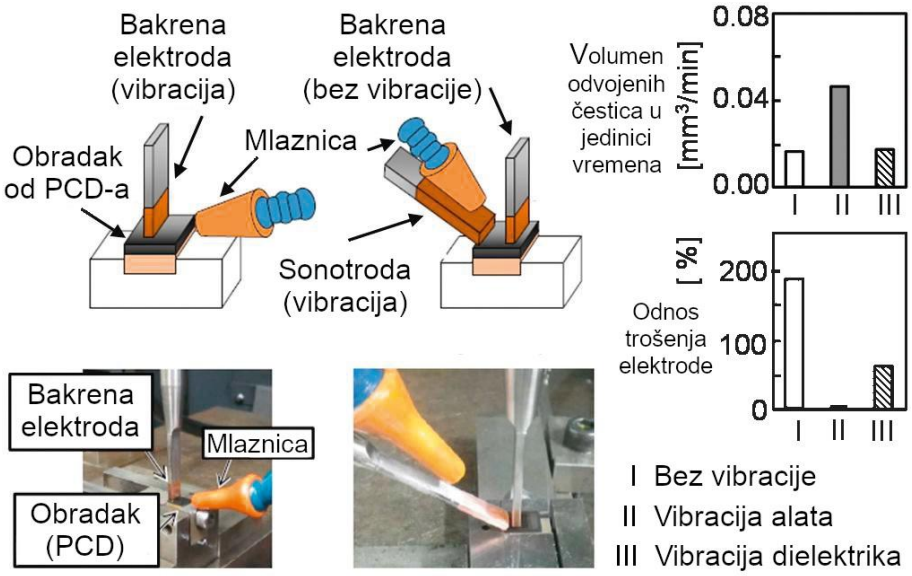
**Nekonvencionalni postupci:**

1. Elektroerozijska obrada potpomognuta vibracijom (Vibration assisted electric discharge machining)

Elektroerozijska obrada ima i svoje nedostatke, npr.: slabo odvođenje odvojene čestice, stvaranje nepoželjnog sloja nastalog taljenjem metala na površini uslijed djelovanja iskre i nadkritičnim hlađenjem, tj. gašenjem tog sloja, slučajni kontakt alata i obratka itd. [27] Kako bi se smanjio ili sasvim uklonio utjecaj negativnih karakteristika elektroerozijskog postupka, dodaje mu se kao sekundarni proces, vibracija frekvencije od 20-60 kHz (može se, u nekim

slučajevima koristiti i niske frekvencije) i amplitude od 2 do 10 μm. Vibracija se može primijeniti na alat, obradak ili dielektričnu tekućinu. [27] Mogu se postići vrlo male hrapavosti površine uz pravilan odabir parametara obrade, a istraživanjem integriteta površine [32] utvrđeno je da se prilikom ultrazvučne vibracije alata smanjuje dubina zone utjecaja topline i nepoželjnog sloja nastalog gašenjem rastaljenog metala.

Kao primjer primjene se navodi obrada polikristaličnog dijamanta (polycrystalline diamond, PCD) elektroerozijskom obradom koja je potpomognuta visokofrekventnom vibracijom bakrene elektrode (alata). Utvrđen je tri puta veći volumen odvojenih čestica u jedinici vremena (Slika 54, gornji dijagram, oznaka II), manje trošenje elektrode (Slika 54, donji dijagram, oznaka II) i u isto vrijeme je zadržana jednaka hrapavost površine u odnosu na konvencionalnu obradu. Najveća primjena ovog postupka je kod mikro obrada. [8]




**Slika 54 Elektroerozijska obrada potpomognuta vibracijom [8]**

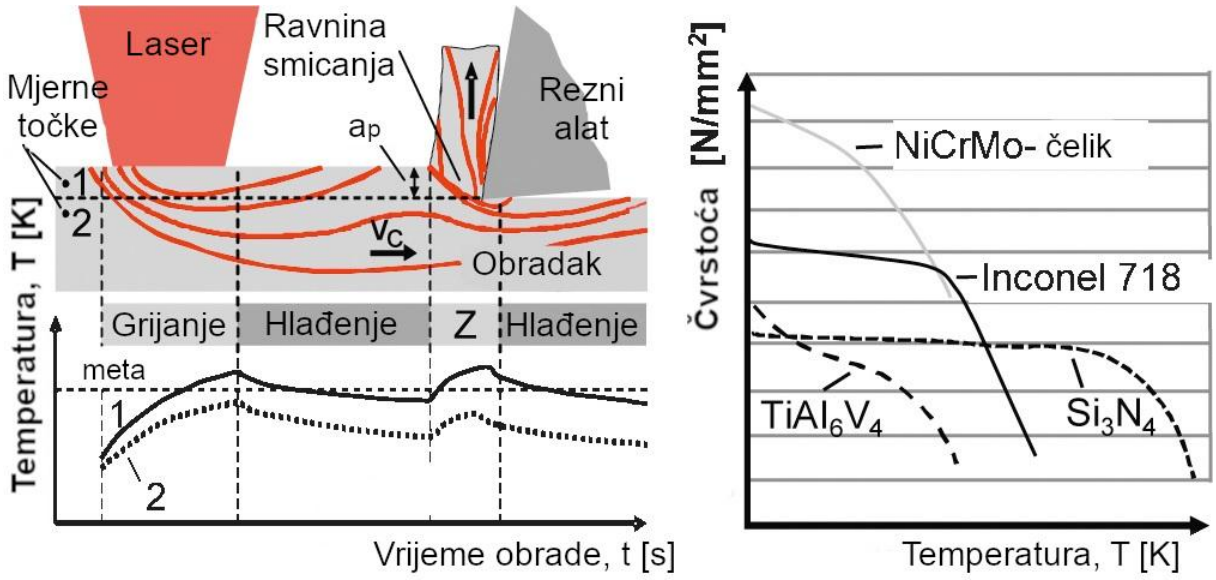
### *3.2.4.2. Obrada potpomognuta laserom (toplinom)*

Toplina, odnosno povećana temperatura uzrokuje smanjenje nekih mehaničkih svojstava materijala, kao što su čvrstoća, krutost i visoka tvrdoća, koji imaju negativan utjecaj na obradivost materijala. Smanjenjem tih mehaničkih svojstava dolazi do smanjenja sila rezanja, povećanja integriteta površine i produživanja vijeka trajanja alata čime se povećava obradivost. Kao izvor topline mogu se koristiti: snop elektrona, plazma, visokofrekventno indukcijsko zagrijavanje, laser itd.

Kod hibridnih procesa je laser ($CO_2$, NdYaG laser) kao izvor topline najrašireniji i najvažniji stoga će se dalje predstaviti primjena lasera u potpomognutim konvencionalnim i nekonvencionalnim postupcima.

**Konvencionalne obrade:**

Kao što je rečeno u 3.2.1 Uvod, usmjeravanjem laserske zrake na dio obratka ispred reznog alata taj dio se zagrijava i postiže se omekšanje, tj. smanjenje čvrstoće materijala čime se olakšava obrada (Slika 55).




**Slika 55 lijevo: promjena temperature u obratku i desno: dijagram čvrstoća – temperatura [8]**

Primjeri postignuća obrada potpomognutih laserom:

- tokarenje kaljenih čelika (umjesto brušenja i konvencionalnog tvrdog tokarenja) – veći volumen odvojenih čestica u jedinici vremena, ravnomjernija tvrdoća površine, jednaka mikrostruktura površine
- obrada teškoobradivih nikal i titan legura – poboljšanje površinskog integriteta, smanjenje sila rezanja (40-60%), produžen vijek trajanja alata
- glodanje titan legura – smanjenje sila rezanja za 21%, povećanje volumena odvojene čestice u jedinici vremena za 34% [8]

Iako se provode istraživanja na polju obrada potpomognutih laserom i sama obrada ima potencijala za obradu tvrdih i krhkih materijala, primjena u industriji je još uvijek rijetka. [8]

**Nekonvencionalne obrade:**

1. Elektroerozijska obrada potpomognuta laserom (Laser assisted EDM)

Iako je u poglavlju 3.2.2. Definicija i karakteristike hibridnih postupaka, rečeno kako bi primarni i sekundarni proces trebali biti bar približno simultani, to ovdje nije slučaj. Redoslijed je takav da se prvo djelovanjem lasera postiže željeni oblik obratka, a zatim se EDM postupkom odvija završna obrada. Time se skraćuje vrijeme obrade i prekomjerno trošenje alata, dakle rješavamo se nedostataka EDM postupka. Isto tako se uklanja sloj gašenog rastaljenog metala, zona utjecaja topline i postiže se veća kvaliteta površine, a svim time se uklanja nepoželjno djelovanje lasera. [27]

2. Elektrokemijska obrada potpomognuta laserom (Laser assisted ECM)

Primjenom lasera dolazi do zagrijavanja elektrolita u zoni obrade i površine obratka, zagrijavanjem elektrolita se povećava kemijska aktivnost i električna vodljivost, a time se ubrzavaju kemijske reakcije elektrolize kojima se odvaja metal, a djelovanjem na površinu obratka (npr. titana) se može ukloniti eventualno nastali oksidni sloj. Kao rezultat se dobiva veći volumen odvojenih čestica u jedinici vremena, bolja kvaliteta površine i veća geometrijska točnost. [8, 27]

### *3.2.4.3. Obrada potpomognuta medijem*

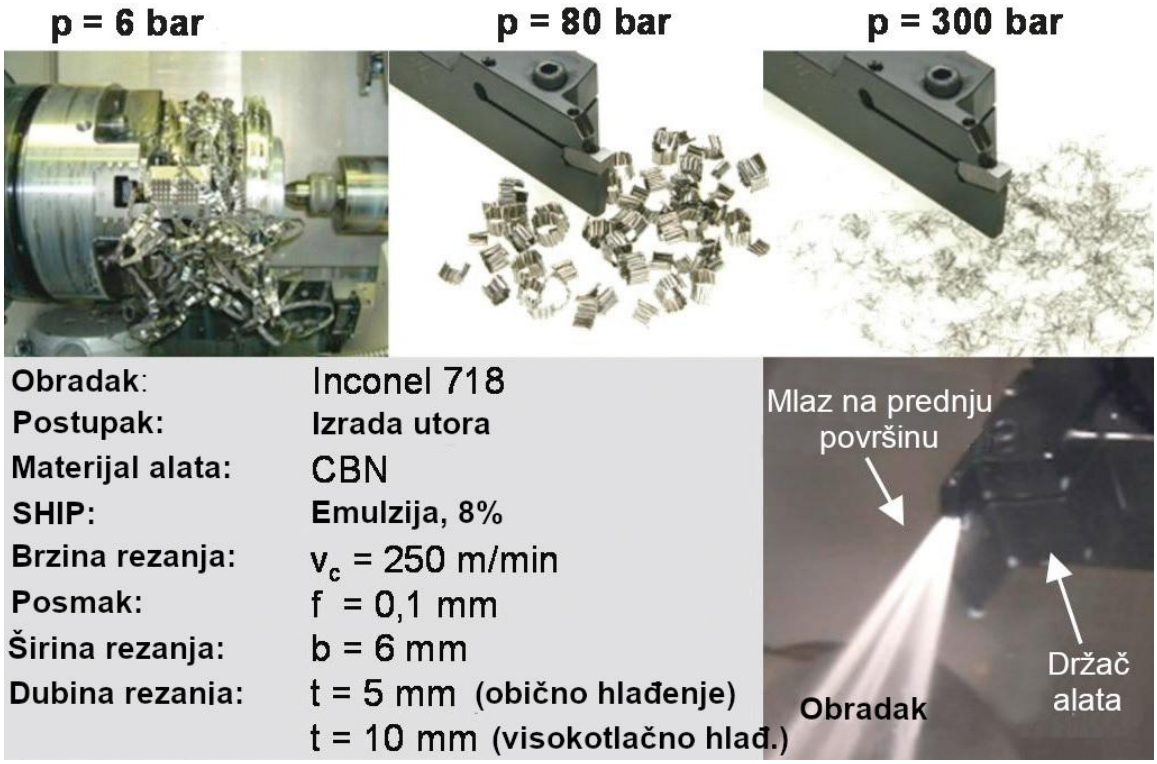
U ovoj skupini procesa kao sekundarni proces može djelovati visokotlačno i kriogeno hlađenje/podmazivanje primjenom odgovarajućih sustava mlaznica. Kada se govori o uobičajenom načinu hlađenja i podmazivanja, a kada o sekundarnom procesu koji je komponenta hibridnog procesa, nije uvijek jasno definirano. Ali ako se radi o sekundarnom procesu onda mora vrijediti da medij uzrokuje značajna poboljšanja procesa obrade. [8]

**Konvencionalne obrade:**

Jedna od važnijih primjena je obrada uz dovod sredstva za hlađenje i podmazivanje pod visokim tlakom. Utjecaj sredstva pod visokim tlakom:

- lom i oblik odvojene čestice – može se izbjeći nepovoljni kontinuirani oblik
- kod obrade teškoobradivih superlegura – temperatura u zoni rezanja uspješno smanjena za 50% uz dovod sredstva pod visokim tlakom (to postignuće je važno jer superlegure zbog svoje loše toplinske provodnosti zadržavaju toplinu u zoni rezanja uslijed čega se razvijaju visoke temperature i dolazi do povećanog trošenja reznog alata)

- kod glodanja legiranih čelika – što je sredstvo (voda) pod višim tlakom to je bolja površinska hrapavost




**Slika 56 Utjecaj dovoda sredstva pod visokim tlakom na oblik odvojene čestice [8]**

Uz sredstva pod visokim tlakom, također se koristi i kriogeno hlađenje. Hlađenje se ostvaruje pomoću tekućeg dušika (liquid nitrogen, $LN_2$) ili $CO_2$. Takvim postupkom se postiže duži vijek trajanja alata, ali u isto vrijeme i povećanje sila rezanja uslijed povećane čvrstoće materijala. Slijede dodatne prednosti obrade potpomognute kriogenim hlađenjem:

- ekološki prihvatljiva obrada odvajanjem čestica
- tokarenje (obradak od TiAl6V4) – donosi poboljšanja u proces obrade
- postignuta bolja površinska hrapavost (titan i nikal legure)
- bolja (sitnozrnata) mikrostruktura [8]

**Nekonvencionalne obrade:**

1. Elektroerozijska obrada potpomognuta medijem (Media assisted EDM)

Obrada teškoobradivih titan i nikal legura također je olakšana visokotlačnim i visokoprotočnim odvođenjem odvojenih čestica metala iz zone obrade.

# 4. MIKRO OBRADE ODVAJANJEM

## 4.1. Uvod

Potreba za mezo (veličine od 1 do 10 mm) i mikro (1 – 1000 μm) proizvodima u svemirskoj industriji, automobilskoj, biomedicinskoj, optičkoj, vojnoj i mikro-elektroničkoj industriji, sve je veća. Posljednja dva do tri desetljeća takvi proizvodi dobivali su se procesima poput ultrazvučne obrade, litografije, elektroplatiranja i kalupljenja, čiji nedostaci: dugotrajnost procesa, ograničenost materijala koji se mogu obrađivati, nemogućnost izrade 3D geometrija te visoka cijena i dugačko pripremno vrijeme, čine te obrade nepovoljnima i neekonomičnima za maloserijsku proizvodnju. Zbog toga se sve više stavlja naglasak na konvencionalne i nekonvencionalne obrade svedene na mikro razinu.

## 4.2. Konvencionalne mikro obrade

Obrada vrlo složenih 3D geometrija dijelova koji su veličine nekoliko desetaka mikrometara do nekoliko milimetara, ostvarivanje visokih geometrijskih točnosti, obrada na malim i energetski učinkovitim strojevima – sve su to prednosti konvencionalnih mikro obrada koje se ostvaruju uz niske troškove uvođenja procesa, visoke volumene odvojenih čestica u jedinici vremena te se, što se materijala tiče, mogu primjenjivati neograničeno. To konvencionalne mikro postupke čini pogodnima za maloserijsku pa čak i pojedinačnu proizvodnju.

Potrebno je naglasiti kako je, uz sve te prednosti, primjena ovih obrada i dalje ograničena jer postoje mnoge nepoznanice i fizikalne pojave s kojima bi se trebalo dobro upoznati.

Neki od tih prepreka prilikom obrade na mikro razini su [33]:

1. Utjecaj veličine (size effect)

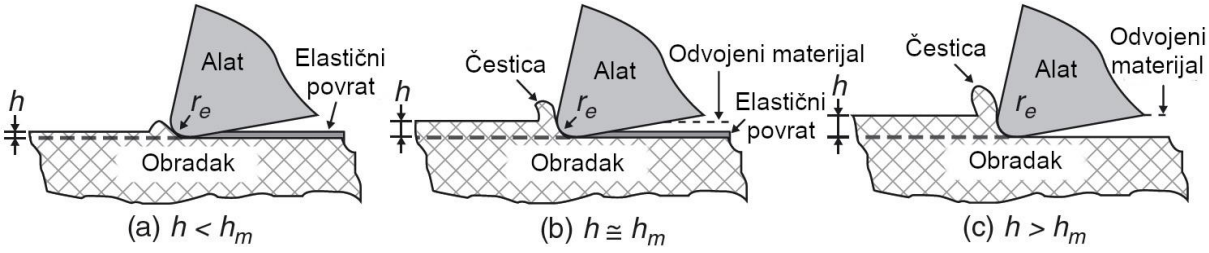
   Kod malih debljina odvojene čestice dolazi do povećanja specifične energije potrebne za odvajanje jedinične količine materijala – ova pojava naziva se utjecaj veličine. Povećanje specifične energije ovisi o: elastičnom povratu materijala koji uzrokuje pritisak na stražnju površinu alata, intenzitetu ili brzini deformacije te gustoći dislokacija (deformacija do koje mora doći kako bi se odvojio materijal, događa se gibanjem dislokacija).

   Utjecaj veličine se definira i kao porast tlaka rezanja (sila rezanja podijeljena s površinom rezanja) sa smanjenjem debljine nedeformirane čestice – h, jer se tako smanjuje i površina rezanja. [33]

2. Najmanja debljina nedeformirane čestice

Zbog niske čvrstoće rezne oštrice mikro alata, debljina nedeformirane čestice – h, mora biti približno jednaka ili čak manja od polumjera zaobljenja rezne oštrice – $r_e$. Zbog tako malog iznosa debljine, ne bi došlo do stvaranja odvojene čestice. Stoga je kritična debljina definirana kao najmanja debljina neodvojene čestice pri kojoj dolazi do procesa odvajanja. Ako je debljina nedeformirane čestice u odnosu na najmanju debljinu neodvojene čestice (Slika 57):

a) manja: ne bi došlo do stvaranja odvojene čestice već bi se materijal samo potisnuo ispod alata i deformirao, a nakon prolaska alata bi došlo do elastičnog povrata materijala, odnosno materijal bi se djelomično vratio u stanje prije deformacije
b) jednaka: došlo bi do smičnog naprezanja u smičnoj ravnini, tj. nastala bi odvojena čestica, ali je zastupljena i elastična deformacija koja rezultira djelomičnim elastičnim povratom materijala → zbog toga je količina odvojenog materijala manja od očekivane
c) veća: stvara se odvojena čestica i može se odvojiti željena količina materijala [33]




**Slika 57 Slučaj kada je, u odnosu na minimalnu debljinu nedeformirane čestice, debljina nedeformirane čestice: a) manja, b) približno jednaka, c) veća [33]**

Dakle dubina rezanja (kod tokarenja) ili posmak po zubu (kod glodanja i bušenja) moraju biti veći od najmanje debljine nedeformirane čestice kako bi došlo do odvajanja. Taj zahtjev na minimalnu debljinu nedeformirane čestice utječe na trošenje alata, sile rezanja, površinsku hrapavost, stabilnost procesa itd. Preostaju pitanja – koliko iznosi minimalna debljina i što utječe na njen iznos. Smatra se kako utjecaj ima: materijal obratka i alata, otpornost na plastičnu deformaciju i iznos polumjera zaobljenja oštrice (u odnosu na polumjer zaobljenja oštrice alata debljina može biti 5% – 38% polumjera zaobljenja oštrice alata, ovisno o materijalu).

Model odvajanja čestice

S obzirom na to da je omjer debljine nedeformirane čestice, h (mali iznos) i polumjera zaobljenja alata, $r_e$ (relativno velik iznos) kod mikro obrada puno manji od takvog

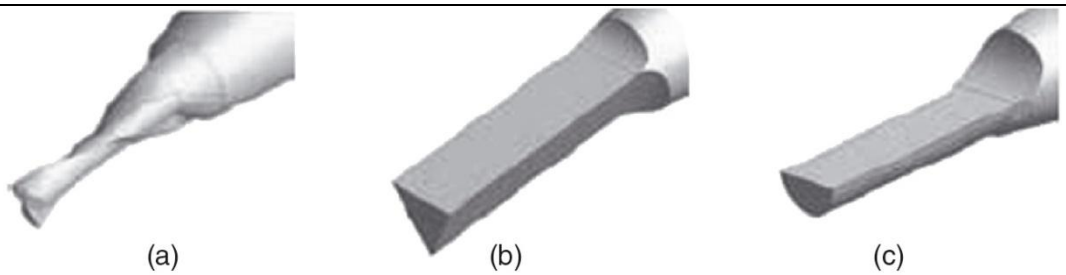
omjera kod makro obrade odvajanjem, nije moguće primijeniti Merchantov model odvajanja koji pretpostavlja: oštru reznu oštricu i da na rezultantnu silu rezanja utječe samo smik u smičnoj zoni i smik zbog trenja između odvojene čestice i prednje površine alata. Kod mikro obrada oštrica alata se ne može smatrati savršeno oštrom jer je polumjer zaobljenja oštrice, kao što je rečeno, približno jednak ili veći od debljine nedeformirane čestice (dubine rezanja/posmaka po zubu). Stoga je predložen alternativni model – model rezanja zaobljenom oštricom (round-edge cutting model) koji uzima u obzir i klizanja po stražnjoj površini (kod Merchantovog modela se trenje na stražnjoj površini alata zanemaruje). Eksperimenti su pokazali kako se tim modelom mogu bolje predvidjeti sile rezanja nego Merchantovim. [33]

3. Utjecaj mikrostrukture i veličine zrna

Dimenzije kristalnih zrna materijala kao što su čelik i aluminij, mogu biti od 0,1 μm do 100 μm, a kako se dimenzije mikro dijelova kreću otprilike od 1 do 1000 μm potrebno je uzeti u obzir i to da se smicanje odvija unutar samog zrna, a ne po granicama zrna kako je to kod makro obrade. Kristalna zrna su anizotropna (svojstva poprimaju različite vrijednosti za različite smjerove [13]) i elastične i plastične deformacije su različite prilikom odvajanja. Zbog toga dolazi do varijacije u iznosima sila, trenja na prednjoj površini alata i elastičnom povratu materijala obratka. [33]

4. Geometrija alata i prevlake

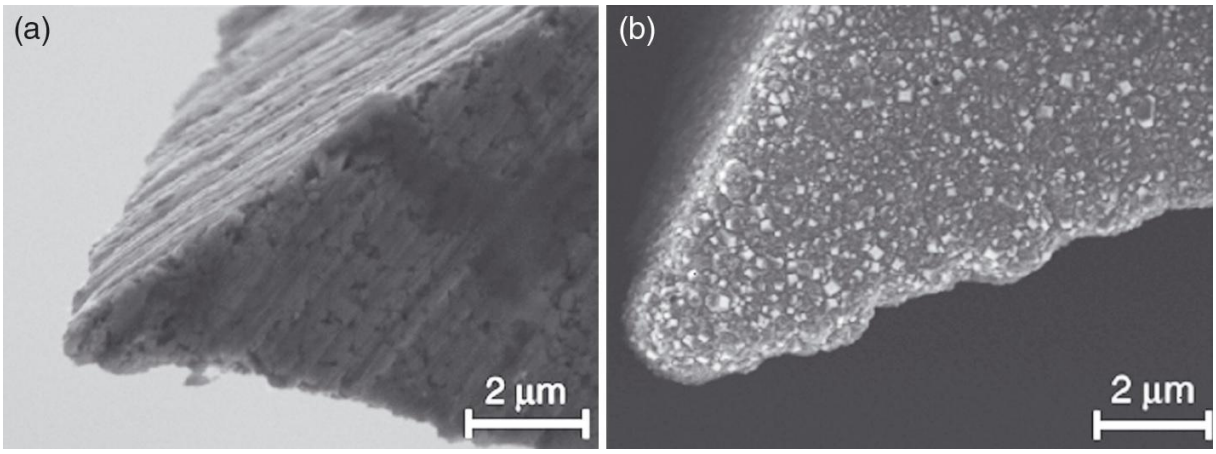
Geometrije mikro alata se ne bi trebale dobivati analogno makro alatima i pod pretpostavkom da su stvaranje odvojene čestice i kinematika procesa jednake kod obje vrste alata, nego bi se trebalo uzeti u obzir kako mikro alati imaju neke drukčije zahtjeve. Čest je slučaj da se, zbog geometrije alata, mora smanjiti, npr. posmak po zubu kako ne bi došlo do progiba alata. Provedeno je istraživanje u kojem su se usporedile različite vrste glodala – glodalo s dva žlijeba, glodalo s trokutastim poprečnim presjekom i glodalo s polukružnim poprečnim presjekom (Slika 58).




**Slika 58 Glodalo: a) s dva žlijeba, b) s trokutastim poprečnim presjekom, c) s polukružnim poprečnim presjekom [33]**

Na nižem broju okretaja glavnog vretena (20 000 okr/min) i posmičnoj brzini ispod 120 mm/min sva su glodala davala zadovoljavajuće rezultate. Kada se povećao broj okretaja, kod glodala s dva žlijeba je došlo do loma alata, kod glodala trokutastog i polukružnog presjeka je došlo do krzanja oštrice i do istrošenja oštrice. Moglo se zaključiti kako trokutasto i polukružno glodalo imaju veću krutost, a glodalo trokutastog presjeka najveću, s time da je kvaliteta obrade trokutastim glodalom bila dosta slabija. Stoga se kao najbolja varijanta uzima glodalo polukružnog presjeka koje ima zadovoljavajuću krutost i kvalitetu obrađene površine. [33]

Na području prevlaka alata provedeno je istraživanje čiji je predmet proučavanja bio utjecaj sitnozrnate (30 – 300 nm) PCD (polikristalični dijamant) prevlake na obradu mikro glodalom od volframovog karbida (WC). Korištenjem prevučenog alata prilikom suhe obrade aluminija, su sile rezanja smanjene za 75% u odnosu na obradu neprevučenim alatom, nije došlo do pojave adhezije te je površina obratka bila ujednačena. Usporedba prevučenog i neprevučenog alata može se vidjeti na slici ispod (Slika 59): [33]




**Slika 59 Usporedba: a) neprevučeni alat (WC), b) alat s PCD prevlakom [33]**

5. Trošenje alata kod mikro obrada

Istraživanjem je pokazano kako na trošenje mikro alata utječu: elastični povrat materijala, progib alata i mali iznosi posmaka.

- Elastični povrat uzrokuje povećanje kontaktne površine između obratka i stražnje površine. To povećanje dovodi do većeg trenja i trošenja stražnje površine alata te povećanja sila rezanja.
- Progib alata uzrokuje neujednačen rad reznih oštrica alata – jedna oštrica alata odvaja više materijala i time dolazi do porasta sila te je trošenje te oštrice veće.
- Kod primjene malih iznosa posmaka dolazi do dvije pojave: smicanja čestice u smičnoj zoni i pritiska na stražnju površinu uslijed podvlačenja materijala, izmjenjujući karakter tih pojava uzrokuje pojavu vibracija. To dinamičko djelovanje na reznu oštricu može uzrokovati krzanje ili lom alata.

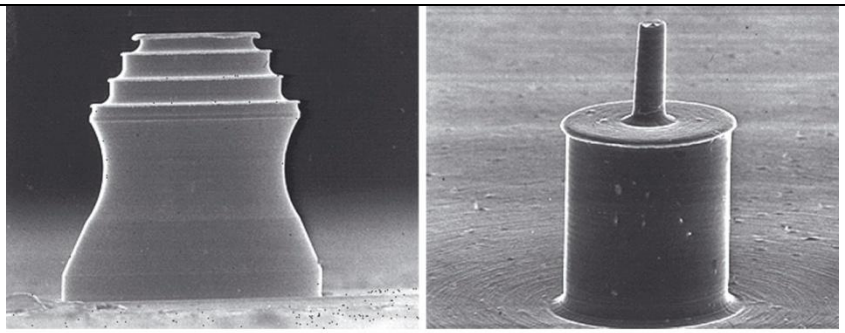
Kod mikro alata do loma može doći već uslijed tupljenja oštrice zbog njenog trošenja. Trošenjem alata se povećava i sila rezanja čime dolazi do znatnog povećanja naprezanja u alatu vrlo malog promjera što može dovesti do loma alata. [33]

6. Krutost alata i progib

Zbog velikog omjera dužine i promjera mikro alata kao što su glodala i svrdla, ti alati imaju malu krutost zbog koje može doći do progiba alata koji uzrokuje netočnost obrade. [33]

### *4.2.1. Mikro tokarenje*

Prilikom mikro tokarenja najčešći materijal alata je polikristalični dijamant (PCD) koji se koristi za dobivanje vrlo malih iznosa hrapavosti površine te se ostvaruju visoke geometrijske točnosti. PCD se kao materijal koristi zbog svoje izrazito visoke tvrdoće, visoke krutosti, toplinske provodnosti i malog faktora trenja. Pogodan je za obradu materijala kao što su: silicij, bakar, zlato, srebro, aluminij, magnezij, cink itd., dok, zbog pojave kemijske difuzije, nije pogodan za obradu: željeza, mangana, nikla, kobalta, titana, kroma, ... Kut prednje površine alata od PCD-a je najčešće 0°. Za postizanje manje površinske hrapavosti kod obrade metala, može se koristiti alat s negativnim kutom prednje površine (-1°ili -2°), dok se za obradu plastičnih materijala koristi pozitivna geometrija. Kut stražnje površine je od 6 do 10 stupnjeva. Primjer obradaka se može vidjeti na sljedećoj slici (Slika 60):




**Slika 60 Prikaz: a) obradak dobiven profilnim mikro tokarenjem, b) mikro osovina s dva različita promjera [33]**

Parametri mikro tokarenja:

- gruba obrada

- dubina rezanja, $a_p$: metali – od 50 do 15 μm (ovisno jesu li tvrdi – čelik, titan, nikal ili meki metali – bakar, aluminij); plastika – nekoliko stotina μm
- posmak, f: 10 – 40 μm/okr

- fina obrada:

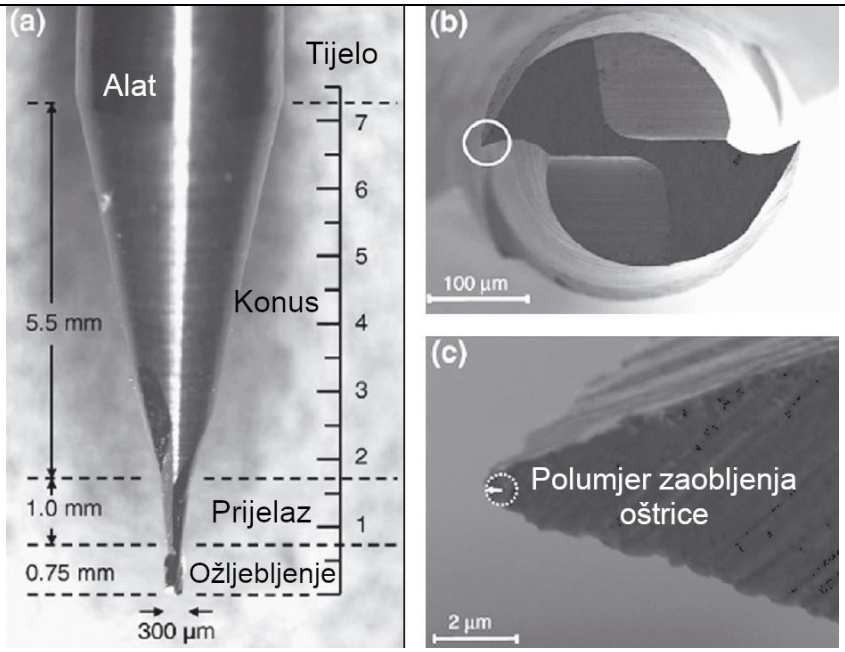
- dubina rezanja, $a_p$: tvrdi metali – oko 1 μm, meki metali – oko 3 μm; plastika – 15 μm

Površinska hrapavost, Ra je izrazito mala i obično iznosi i manje od 5 nm. [33]

### *4.2.2. Mikro glodanje*

Mikro glodanje je ekonomična obrada za brzu izradu malih serija 3D dijelova od metala, plastike i keramike. Mogu se postići geometrijski točni dijelovi veličine 5 – 10 μm, s malim iznosima površinske hrapavosti uz velike volumene odvojenih čestica u jedinici vremena. Mikro glodala se najčešće izrađuju od tvrdog metala (kristalna zrna volframova karbida, WC čine 15% i veličine su ~ 4 μm; vezivo je kobalt, Co – 75%). Promjer alata može biti 25 μm, dok je polumjer zaobljenja oštrice, $r_e$ ograničen na veličinu između 1,5 i 5 μm. Primjeri parametara prilikom mikro glodanja aluminija (kako bi se sile rezanja zadržale ispod 5 N):

- dubina rezanja, $a_p$: 100 μm
- posmak po zubu, $f_z$: 20 μm/zubu



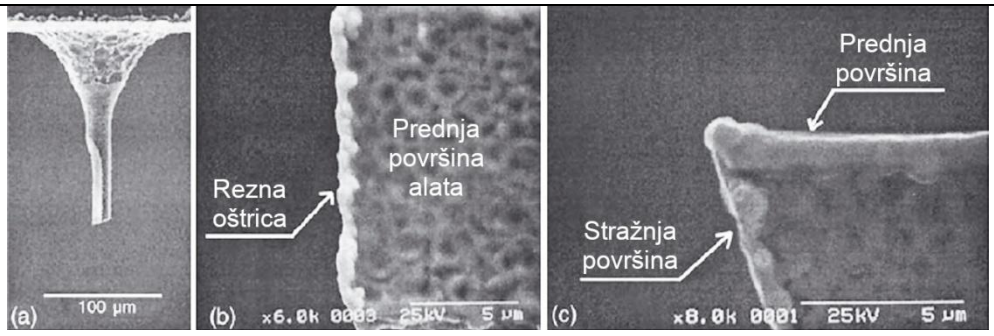

**Slika 61 Prikaz: a) mikro glodala promjera 300 µm, b) SEM slika dna alata, c) oštrica alata s polumjerom zaobljenja [33]**

Sile rezanja teško je predvidjeti jer značajno ovise o odnosu debljine nedeformirane čestice, h i polumjeru zaobljenja oštrice, $r_e$. Kako je promjer mikro glodala vrlo mali, uslijed prevelikih sila lako može doći do loma alata. U odnosu na konvencionalno glodanje, mikro glodanje se razlikuje i prema odvajanju čestice. Kao što je već spomenuto, do stvaranja odvojene čestice ne dolazi u svim slučajevima nego se odvojena čestica stvara samo onda kada posmak po zubu poprimi vrijednost jednaku ili veću od minimalne debljine nedeformirane čestice.

Radi boljeg razumijevanja i boljih rezultata, sve specifičnosti i parametre koji imaju utjecaj na proces mikro obrade se nastoji objediniti u numeričkom modelu dobivenog metodom konačnih elemenata (finite element method, FEM) čime bi se moglo prikupiti znanje o utjecaju mikrostrukture i veličine zrna, o deformacijama te bi se FEM simulacijama mogli optimizirati parametri i geometrija glodala. [33]

### *4.2.3. Mikro bušenje*

Mikro bušenje ima široku primjenu zbog toga što rezultira provrtima točnog oblika i dobre površinske hrapavosti u kratkom vremenu obrade. Koristi se za obradu tiskanih pločica (printed circuit board, PCB) prilikom koje se izrađuje veliki broj prolaznih mikro provrta. Prednost mikro bušenja pred laserskom obradom ili EDM obradom je ta što se može postići veća točnost i kvaliteta provrta. Može se koristiti i pri obradi keramike. Keramičke pločice s velikim brojem mikro provrta se koriste kao filteri, električki izolatori itd.



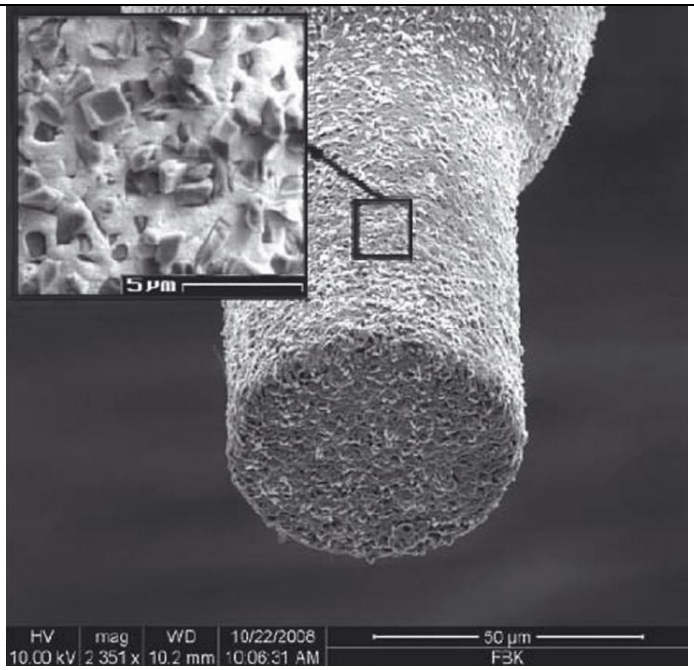

**Slika 62 Prikaz mikro svrdla [33]**

Alat od volframovog karbida sa slike iznad (Slika 62), je izrađen elektroerozijskim brušenjem, ima poprečni presjek u obliku slova D te polumjer zaobljenja rezne oštrice, $r_e$ je jednak 0,5 µm. Istraživanjem je dokazano kako je tim alatom moguće izraditi provrt čiji je promjer samo 6,7 µm.

Prilikom mikro bušenja javljaju se tri velika problema: porast sile rezanja, odstupajuće posmično gibanje alata i lom alata. Što svrdlo prolazi dublje u materijal obratka, to su sile rezanja veće, a do porasta sila dolazi zbog trenja između tijela svrdla i obrađenih stijenki provrta. Odstupajuće posmično gibanje se odnosi na to što prilikom prodiranja svrdla u materijal obratka, posmično gibanje u nekoj mjeri odstupa od pravca po kojem se treba gibati i to je kod mikro alata naglašenije u odnosu na makro bušenje i potrebno je duže vrijeme da se gibanje stabilizira. Posljednji veliki problem proizlazi iz vrlo niske krutosti mikro svrdla zbog velikog odnosa dimenzija (dužine i promjera). Uz nisku krutost, na lom alata kod bušenja utječe i problem začepljenja žljebova odvojenim česticama, a ne može se riješiti niti primjenom SHIP-a jer sredstvo ne može doprijeti do zone rezanja. [33]

### *4.2.4. Mikro brušenje*

Alat korišten prilikom mikro brušenja je brusni disk koji se sastoji od abraziva i matrice. Vrsta abraziva, veličina zrna i vrsta matrice ovise o materijalu obratka i svrsi brušenja. Mogu se postići vrlo dobre točnosti i površinske hrapavosti – rečeno je kako se može postići hrapavost od 10 nm ako se dubina rezanja drži ispod 100 nm. Mikro brušenje se koristi za: obradu cilindričnih dijelova i utora malih dimenzija, postizanje vrlo fine obrade ravnih površina, obradu keramičkih dijelova motora i ležajeva i za oblikovanje mikro glodala od volframovog karbida i mikro svrdala. Također se koristi za obradu ostalih tvrdih i krhkih materijala. [33]




**Slika 63 Prikaz mikro brusnog diska (Φ 45 µm) i zrna (veličina: 1 – 3 µm) [33]**

## 4.3. Nekonvencionalne (napredne) mikro obrade

### *4.3.1. Pojedinačne nekonvencionalne mikro obrade*

1. Mikro elektroerozijska obrada (µEDM)

Mikro EDM je spora obrada i funkcionira na istom principu kao i makro EDM, s time da se kod mikro EDM-a javljaju bitne razlike kod veličine alata, načina proizvodnje mikro alata, energije korištene za stvaranje iskre, održavanja razmaka između alata i obratka te načina odvođenja topline i odvojenih čestica iz zone rezanja (npr. zbog malih dimenzija alata se dielektrik ne može dovoditi kroz alat). Kod µEDM obrade ne postoji kontakt između alata i obratka (ne pojavljuju se sile rezanja) te je obrada ekonomična. Te karakteristike su razlog zašto je µEDM važan za obradu minijaturnih dijelova, mikro elektromehaničkih dijelova i mikro obradu teškoobradivih materijala.

Mogu se postići visoke geometrijske točnosti i površinske kvalitete (površinska hrapavost iznosi otprilike 0,1 µm). Trošenje alata prisutno je zbog topline nastale iskrenjem i ovisi o svojstvima materijala kao što su: temperatura vrelišta, temperatura tališta te toplinska provodnost. Alat se manje troši ako ima visoku temperaturu vrelišta i tališta te visoku toplinsku provodnost. Trošenje alata se može smanjiti i skraćivanjem vremena iskrenja i smanjenjem jakosti struje čime se uzrokuje i smanjenje površinske hrapavosti, ali i smanjenje efekta odvajanja materijala. Volumen odvojenih čestica u jedinici vremena dobiva se iz volumena odvojenog materijala ili iz razlike mase obratka prije i nakon obrade.

Koristi se za izradu: alata za mikro tokarenje, mikro glodala, mikro alata za brušenje, kalupa, provrta velikog omjera dubine i promjera itd. [33]

### *4.3.2. Hibridne mikro obrade*

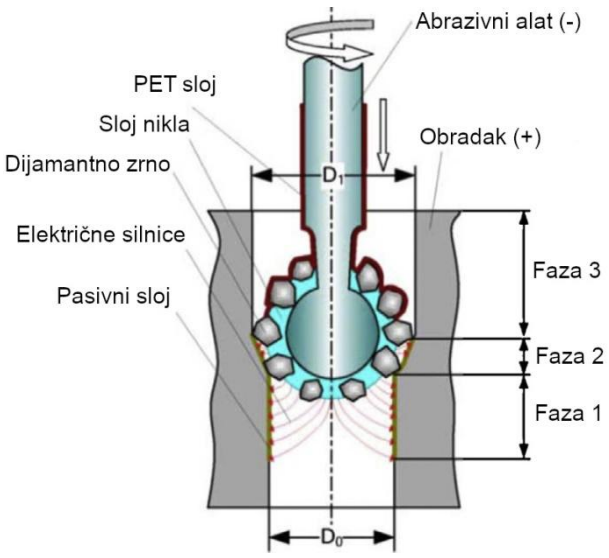
#### *4.3.2.1. Uvod*

Hibridne mikro obrade još su u povojima i predmet su mnogih istraživanja te se mali broj postupaka uspio primijeniti u industriji. Međutim, s obzirom na mogućnosti koje pružaju prilikom pravilne primjene – poboljšanje površinske hrapavosti, geometrijske točnosti, veći volumen odvojenih čestica u jedinici vremena, produženje vijeka trajanja alata, moguća obrada složenih mikro dijelova iz teškoobradivih materijala itd., jasno je kako imaju veliki potencijal i da su potrebna daljnja istraživanja na tom području kako bi se omogućila njihova šira primjena.

#### *4.3.2.2. Miješane hibridne mikro obrade*

1. Mikro elektrokemijska obrada i brušenje (µECM and micro grinding)

Prilikom ove obrade se kao alat koristi metalna šipka s kuglom na jednom kraju, koja je prekrivena električki neprovodljivim abrazivom od PCD-a (Slika 64), a princip rada je vrlo sličan kao kod jednake obrade samo na makro razini (opisano u poglavlju: 3.2.3.1). Alat, koji je spojen na negativan pol izvora istosmjerne struje (katoda), rotira visokim brzinama te se materijal s obratka koji je spojen na plus pol (anoda), odvaja elektrokemijski i mehanički. Slično kao kod obrade na makro razini, abraziv održava efektivni razmak između vodljivog metalnog dijela i obratka.



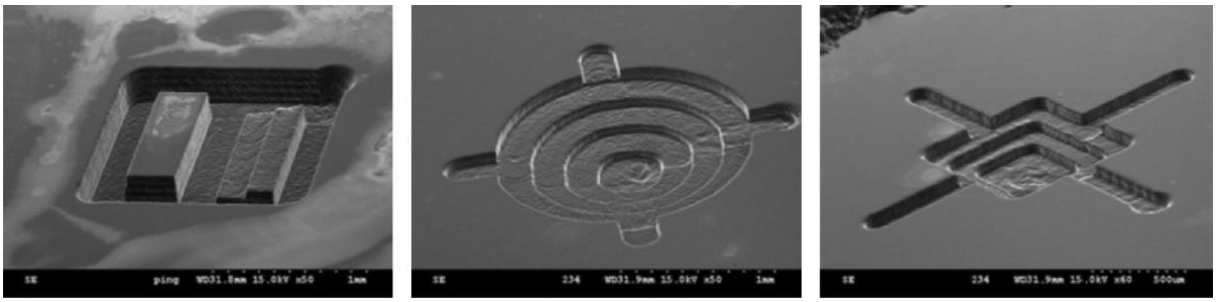

**Slika 64 µECM i mikro brušenje [29]**

Kako bi se zadržala geometrijska točnost provrta, savjetuje se da se alat izolira sve do polovice kugle jer se tako sprječava daljnja elektrokemijska obrada već obrađene površine provrta. [29]

2. Mikro elektroerozijska i elektrokemijska obrada (Micro electrochemical discharge machining, μECDM)

Princip rada je jednak kao kod makro ECDM obrade, što je opisano u: 3.2.3.3. Toplinski procesi - elektroerozijska obrada i elektrokemijska obrada (Electrochemical discharge machining, ECDM). Istraživanjem se utvrdilo kako napon koji se primjenjuje tijekom obrade više utječe na volumen odvojenih čestica u jedinici vremena i dubinu zone utjecaja topline od parametara kao što su: koncentracija elektrolita, koliko je alat uronjen u elektrolit i prostora između elektroda (alata i obratka). [29]

Primjenjuje se za obradu mikro provrta, kanala i struktura. Interesantno je što se može primijeniti za obradu materijala koji nisu vodiči, npr. staklo i keramika (Slika 65), a to se postiže korištenjem pomoćne elektrode koja je umjesto obratka spojena na izvor struje. [33]



**Slika 65 3D mikrostrukture u staklu dobivene μECDM obradom [29]**

### *4.3.2.3. Potpomognute hibridne mikro obrade*

#### *4.3.2.3.1 Mikro obrade potpomognute vibracijom*

Kao i kod obrade potpomognute vibracijom na makro razini, vibracija male amplitude se može primijeniti na alat, obradak ili radnu tekućinu (npr. dielektrik).

**Konvencionalne mikro obrade:**

Prilikom konvencionalnih mikro obrada potpomognutih vibracijom dolazi do smanjenja sila rezanja i trošenja alata, smanjenog stvaranja srha, povoljnijeg oblika odvojenih čestica te smanjenja površinske hrapavosti, a volumen odvojenih čestica u jedinici vremena raste s

padom čvrstoće materijala obratka. [29], [8] Mora se imati na umu da može doći i do pojave pukotina na površini zbog kontinuiranog udarnog djelovanja površine alata na površinu obratka uslijed vibracije. Provedena su brojna istraživanja na ovom području, neki od rezultata su:

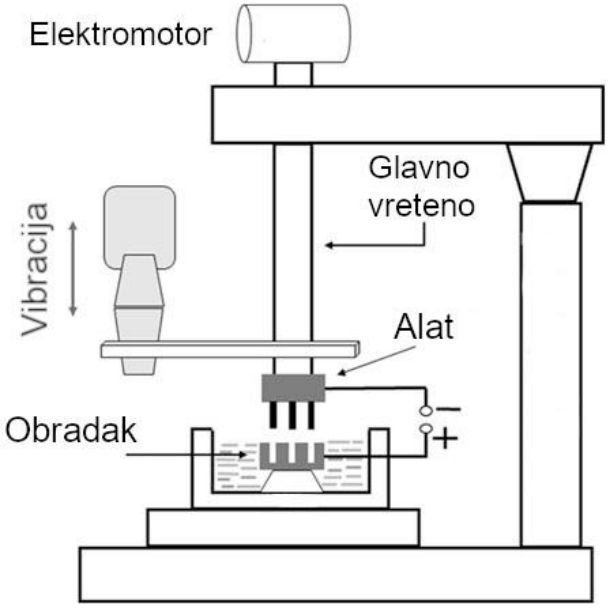
- primjenom vibracije na alat prilikom mikro glodanja, bušenja i brušenja se može postići: točnija geometrija, bolja površinska kvaliteta, manje krzanje alata te ostali oblici trošenja reznog alata u odnosu na mikro obrade bez vibracije [29]
- mikro poliranjem (lepanjem) potpomognutim vibracijom su se uspjeli obraditi provrti promjera samo 5 μm u obratcima od materijala kao: kvarcno staklo i silicij [8]
- prilikom obrade kalupa od volframovog karbida je postignuta hrapavost, Rz od čak 8 nm obradom mikro poliranja (lepanja) potpomognutog vibracijom alata [29]
- kada se radi o vibraciji obratka:
    - mikro glodanjem i bušenjem aluminijske legure uz vibraciju u smjeru dvije osi (vibracija obratka ima eliptičnu putanju) je smanjena greška prilikom pozicioniranja, poboljšana je površinska hrapavost i produžen vijek trajanja alata [29]
    - obrada stakla, legura aluminija i nehrđajućeg čelika uz smanjenu silu rezanja (60 – 70%), duži vijek trajanja alata i veću postizivu dubinu provrta se postiže obradom mikro bušenja potpomognutog vibracijom [29]

**Nekonvencionalne mikro obrade:**

1. Mikro elektroerozijska obrada potpomognuta vibracijom (Vibration assisted μEDM)

Kao što je opisano u: 3.2.4.1. Obrada potpomognuta vibracijom, elektroerozijska obrada potpomognuta vibracijom ima široku znanstvenu i industrijsku primjenu kao mikro obrada. Glavni cilj razvoja ove obrade je povećanje postizivog omjera dubine i promjera uz održavanje geometrijske točnosti. Glavni preduvjet za to je stabilnost procesa, a najveći utjecaj na stabilnost imaju uvjeti odvođenja produkata izgaranja dielektrikom i uvjeti u prostoru između alata i obratka. Uobičajene metode poboljšavanja odvođenja produkata – dovođenje dielektrika pod visokim tlakom ili dovođenje kroz alat, nije moguće primijeniti zbog male krutosti te malih dimenzija alata. Stoga je primjena vibracije odlično rješenje i pokazalo se da značajno povećava stabilnost procesa. Zahvaljujući periodičnom gibanju alata ili obratka dolazi do uzburkivanja i toka dielektrika uslijed kojeg se smanjuje taloženje i nakupljanje odvojenih čestica. Tim čišćenjem i dovođenjem novog dielektrika se ubrzava

proces i čini ga se stabilnijim te se postižu više geometrijske točnosti te se omogućuje obrada značajki većih dimenzijskih omjera i veće geometrijske složenosti. [8]




**Slika 66 Postupak elektroerozijske obrade potpomognute vibracijom [27]**

Kao primjer primjene može se navesti:

- izrada mikro provrta promjera manjeg od 0,2 mm i omjerom dimenzija većim od 15 u leguri titana (ostvarena: veća efikasnost, stabilnost i bolja površinska kvaliteta u odnosu na μEDM bez vibracije)
- pri izradi udubljenja s omjerom dimenzija 12, u superleguri na bazi nikla (MAR 247; za komponente turbine), se trošenje alata smanjilo za 21% i volumen odvojenih čestica u jedinici vremena se povećao za 11% u odnosu na μEDM bez vibracije. [27]

#### *4.3.2.3.2 Mikro obrade potpomognute laserom*

**Konvencionalne mikro obrade:**

1. Mikro glodanje/brušenje potpomognuto laserom (Laser assisted micro milling/grinding)

Kao što je već spomenuto u: 3.2.1. Uvod, kod obrade potpomognute laserom se laserska zraka usmjerava na dio obratka ispred, u slučaju mikro obrade, mikro alata. Time se zagrijava dio površine obratka i smanjuje mu se čvrstoća odnosno olakšava proces odvajanja. Prednosti ovog postupka su te što rezultira smanjenjem sila rezanja, povećanjem točnosti i smanjenjem površinske hrapavosti. Uz prednosti postoje i nedostaci [29]:

- djelovanje topline uzrokuje nastanak zone utjecaja topline (ZUT) i pojavu pukotina

- skraćenje vijeka trajanja alata – također uzrokovano djelovanjem topline (pojava difuzijskog i adhezijskog trošenja)
- uslijed omekšanja obratka je pojava srha puno češća (ako je promjer alata veći od promjera površine na koju djeluje laserska zraka – neće doći do porasta pojave srha)

**Nekonvencionalne mikro obrade:**

1. Mikro elektroerozijska obrada potpomognuta laserom (Laser assisted μEDM)

Postupak opisan u: 3.2.4.2. Obrada potpomognuta laserom (toplinom), se često koristi za mikro obradu kako bi se skratilo vrijeme obrade i uklonio nepoželjni sloj nastao toplinskim djelovanjem laserske zrake. Također se može postići veća efikasnost, produktivnost i površinska kvaliteta u odnosu na zasebnu lasersku mikro obradu ili zasebnu elektroerozijsku mikro obradu.

Mogu se obraditi: složene 3D mikro strukture, mikro utori te provrti promjera 140 μm (npr. na brizgalicama za dizelsko gorivo). [27]

2. Mikro elektrokemijska obrada potpomognuta laserom (Laser assisted μECM)

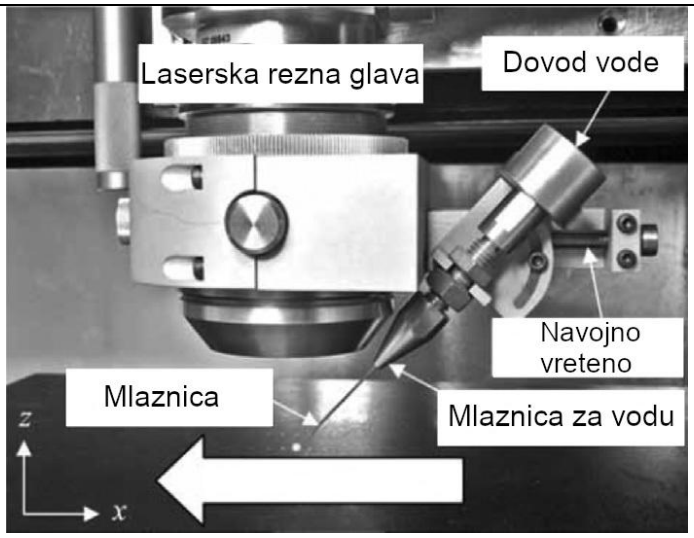
Proces se primjenjuje za izradu mikro provrta i geometrija, a kao materijali obradaka se mogu koristiti teškoobradivi metali i legure, kompoziti i keramika. [27]

Princip rada je objašnjen u: 3.2.4.2. Obrada potpomognuta laserom (toplinom).

*4.3.2.3.3 Mikro obrade potpomognute medijem*

1. Mikro laserska obrada potpomognuta vodom (Water assisted micro laser machining)

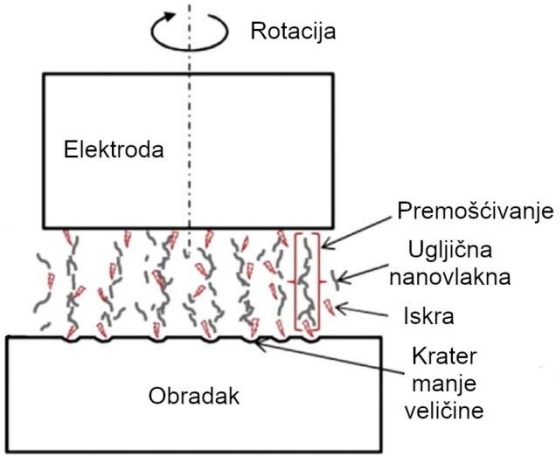
Obrada mikro provrta velikog omjera dimenzija u materijalima kao što su silicij, staklo i $Al_2O_3$, moguća je mikro laserskom obradom uz koju se koristi i energija tankog mlaza vode. Mlaz vode se usmjerava na površinu obratka i, iz zone obrade, uklanja odvojene čestice koje bi se nepotrebno zagrijavale i trošile energiju. Time se postiže otprilike dva puta veći volumen odvojenih čestica u jedinici vremena. Izrada provrta je efikasnija, s manje mikro pukotina i manjom zonom utjecaja topline u odnosu na obradu bez djelovanja vode. Negativna strana je ta što se postiže hrapavija površina zbog ubrzanog skrućivanja rastaljenog metala. [29]




**Slika 67 Elementi sustava za lasersku mikro obradu potpomognutu vodom [29]**

*4.3.2.3.4 Mikro elektroerozijska obrada potpomognuta ugljičnim nano vlaknima (Carbon nanofiber – assisted μEDM)*

Ugljična nano vlakna imaju sposobnost stvaranja mikro lanaca, koji se pružaju između alata i obratka (elektroda) prilikom mikro elektroerozijske obrade. Vlakna se mogu primijeniti u dielektričnoj tekućini te se zbog izvrsne električne provodnosti koriste za savladavanje električnog otpora dielektrika, a time se može povećati razmak između alata i obratka bez negativnog utjecaja na proces iskrenja. Također uzrokuje i povećanje učestalosti iskrenja čime se povećava volumen odvojenih čestica u jedinici vremena. [29]




**Slika 68 Prikaz μEDM obrade potpomognute ugljičnim nano vlaknima [29]**

# ZAKLJUČAK

Veliki broj konkurentnih tvrtki, različitost kod zahtjeva kupaca, novi materijali alata i obradaka, društvena i ekološka odgovornost, općeniti tehnološki razvitak – sve su to čimbenici koji nalažu i potiču promjene i poboljšanja kod postupaka obrade odvajanjem. S obzirom na različitost koja krasi cijeli svijet pa i industrijske potrebe, široka ponuda postupaka obrade omogućuje odabir onog koji najbolje odgovara određenoj primjeni. U ovom je radu predstavljen samo dio tog velikog broja obrada. Razvojem na području obrade odvajanjem teži se za neku primjenu u kraćem vremenu i uz manje financijske troškove postići kvalitetnije proizvode, u uvjetima autonomnijeg, automatiziranijeg, „pametnijeg“, tj. inteligentnijeg postrojenja koje će imati manje gubitke, otpad i minimalan negativni utjecaj na okoliš. Nužno je spomenuti kako se sve više ističe važnost ekološke osviještenosti i trend održivosti gdje se u procese nastoji implementirati alternativna, „zelenija“ rješenja. Kratkoročno gledano ta rješenja možda ne mogu podržati visoke performanse stroja ili zahtijevaju veća ulaganja, ali dugoročno se mogu izbjeći štete koje su neprocjenjive i nepovratne.

# LITERATURA

[1] J. Hagel III, J. S. Brown, D. Kulasooriya, C. Giffi i M. Chen, »The future of manufacturing (Making things in a changing world),« Deloitte University Press, 2015.

[2] T. Udiljak, »Oblikovanje deformiranjem i obrada odvajanjem: Prvo predavanje,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[3] K.-D. Thoben, S. Wiesner i T. Wuest, »"Industrie 4.0" and Smart Manufacturing - A review of Research Issues and Application Examples,« ResearchGate, 2016.

[4] D. Dai, »From Steel to Smartphones, Meet the Forum's New Factories of the Future,« World Economic Forum, 2019.

[5] B. Bagheri, S. Yang, H.-A. Kao i J. Lee, »Cyber-physical Systems Architecture for Self-Aware Machines in Industry 4.0 Environment,« Elsevier Ltd., 2015.

[6] »Enabling the Next Production Revolution: the Future of Manufacturing and Services - Interim Report,« Organization for economic cooperation and development, 2016.

[7] T. Udiljak, »Visokobrzinske obrade,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[8] B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A. E. Tekkaya, R. Neugebauer i D. Mcintosh, »Hybrid processes in manufacturing,« *CIRP Annals - Manufacturing Technology 63,* pp. 561-583, 2014.

[9] W. Du, Q. Bai i B. Zhang, »A Novel Method for Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing of Metallic Parts,« *Procedia Manufacturing,* svez. 5, pp. 1018-1030, 2016.

[10] H. Tschätsch, »Applied Machining Technology,« Springer, 2007.

[11] T. Sugihara, H. Tanaka i T. Enomoto, »Development of Novel CBN Cutting Tool for High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Coolant Behaviors,« *Procedia Manufacturing 10,* pp. 436-442, 2017.

[12] D. D'Addona, S. J. Raykar i M. M. Narke, »High speed machining of Inconel 718: tool wear and surface roughness analysis,« *Procedia CIRP 62,* pp. 269 - 274, 2017.

[13] »Hrvatska enciklopedija,« Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [Mrežno]. Available:

] http://www.enciklopedija.hr/. [Pokušaj pristupa 2019].

[14 ] T. Udiljak, »HSC + HARD + DRY obrade,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[15 ] H. A. Youssef i H. El-Hofy, »Machining technology: machine tools and operations,« CRC Press, 2008.

[16 ] T. Sugihara, P. Singh i T. Enomoto, »Development of novel cutting tools with dimple textured surfaces for dry machining of aluminum alloys,« *Procedia Manufacturing 14,* pp. 111-117, 2017.

[17 ] S. Imbrogno, S. Sartori, A. Bordin, S. Bruschi i D. Umbrello, »Machining simulation of Ti6Al4V under dry and cryogenic conditions,« *Procedia CIRP 58,* p. 475 – 480, 2017.

[18 ] S. Kalpakjian, S. R. Schmid i H. Musa, Manufacturing Engineering and Technology, 6 ur., Pearson, 2009.

[19 ] »SANDVIK,« [Mrežno]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/catalogues/en-gb/c-2940-137.pdf. [Pokušaj pristupa 2019].

[20 ] D. D'Addona i S. J. Raykar, »Analysis of surface roughness in hard turning using wiper insert geometry,« *Procedia CIRP 41,* pp. 841-846, 2016.

[21 ] »SANDVIK Coromant,« [Mrežno]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/campaigns/primeturning/pages/default.aspx?Country=hr. [Pokušaj pristupa 2019].

[22 ] H. A.-G. El-Hofy, Advanced Machining Processes, McGraw-Hill, 2005.

[23 ] N. Dahotre i A. Samant, Laser Machining of Advanced Materials, CRC Press/Balkema, 2011.

[24 ] ELSEVIER, Advanced Materials and Applications: Tackling New R&D and Engineering Challenges.

[25 ] T. Udiljak, »Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem čestica,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[26 ] P. S. Spinney, D. G. Howitt, R. L. Smith i S. D. Collins, »Nanopore formation by low-energy focused electron beam machining,« *Nanotechnology,* br. 21, 2010.

[27 ] K. Gupta, N. K. Jain i R. F. Laubscher, Hybrid Machining Processes (Perspectives on Machining and Finishing), Springer, 2016.

[28] D. Graham, »Top Performance Grades Get a Laser Assist for Machining Medical Ceramics,« 2013. [Mrežno]. Available: http://cuttingedgeconversation.blogspot.com/2013/03/top-performance-grades-get-laser-assist.html.

[29] S. Z. Chavoshi i X. Luo, »Hybrid micro-machining processes: A review,« *Precision Engineering*, br. 41, pp. 1-23, 2015.

[30] A. Schubert, A. Nestler, S. Pinternagel i H. Zeidler, »Influence of Ultrasonic Vibration Assistance on the Surface Integrity in Turning of the Aluminum Alloy AA2017,« *Materials Science and Engineering Technology*, svez. 42, br. 7, pp. 658-665, 2011.

[31] D. Ciglar, »Suvremeni postupci brušenja s povećanom proizvodnošću,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.

[32] A. Abdullah, M. Shabgard, A. Ivanov i M. Shervanyi, »Effect of Ultrasonic-Assisted EDM of the Surface Integrity of Cemented Tungsten Carbide (WC-Co),« *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 41, pp. 268-280, 2009.

[33] M. Koc i T. Özel, Micro-manufacturing: Design and Manufacturing od Micro-Products, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[34] »5ME,« 2016. [Mrežno]. Available: http://5me.com/why-cryogenic-machining-reduces-titanium-machining-costs-for-the-aerospace-sector/.

# PRILOZI

I. CD-R disc