

# Hibridni procesi obrade i obradni strojevi

---

**Lesičar, Vilim**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:517344>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Vilim Lesičar**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Ciglar, dipl. ing.

Student:

Vilim Lesičar

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Ciglaru na prenesenom znanju te na pomoći i danim savjetima tijekom pisanja završnog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, djevojci i kolegama na potpori i motivaciji koju mi pružaju kroz godine studiranja, a posebno djedu koji me usmjerio na strojarstvo.

Vilim Lesičar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Vilim Lesičar** JMBAG: **0035230335**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Hibridni procesi obrade i obradni strojevi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Hybrid machining processes and machine tools**

Opis zadatka:

Kako bi se povećala učinkovitost i produktivnost obrade, osigurala ekonomičnija i brža proizvodnja kompleksnih dijelova izrađenih od novih, naprednih i teškoobradivih materijala, razvijaju se hibridne obrade ili hibridni procesi. Oni ujedno omogućuju ili olakšavaju obradu takvih materijala, a predstavljaju kombinaciju više različitih tehnologija obrade na jednoj obradnoj platformi odnosno hibridnom obradnom stroju.

U radu je potrebno dati literaturni pregled hibridnih procesa obrade i dostupnih izvedbi hibridnih obradnih strojeva, opisati njihov rad i namjenu, te dati osnovne karakteristike tih suvremenih obradnih sustava.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.  
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc.  Damir Čiglar

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
2. TEŠKOOBRADIVI MATERIJALI .....	2
2.1. Legure na bazi titana .....	2
2.2. Legure na bazi nikla .....	3
2.3. Keramika .....	4
2.4. Kompoziti.....	5
2.5. Željezne legure .....	7
3. HIBRIDNI PROCESI I NJIHOVA KLASIFIKACIJA.....	8
3.1. Klasifikacija hibridnih procesa .....	9
4. POTPOMOGNUTI HIBRIDNI PROCESI OBRADNE.....	11
4.1. Obrada potpomognuta vibracijama .....	11
4.2. Obrada potpomognuta laserom .....	13
4.3. Medijem potpomognuta obrada .....	15
4.3.1. Obrada uporabom sredstva pod visokim tlakom (HPC).....	15
4.3.2. Obrada uz primjenu minimalne količine maziva (MQL) .....	16
4.3.3. Kriogena obrada.....	17
5. KOMBINIRANI HIBRIDNI PROCESI OBRADNE.....	20
5.1. Kombinacija obrade odvajanjem i elektroerozije (EDM).....	20
5.2. Kombinacija obrade odvajanjem i elektrokemijske obrade.....	22
5.3. Kombinacija elektroerozije i elektrokemijske obrade (EDM i ECM) .....	23
6. KONTROLIRANA PRIMJENA PROCESNIH MEHANIZAMA .....	24
6.1. Lasersko oblaganje i glodanje.....	24
6.2. Elektrolučno navarivanje i glodanje .....	26
6.3. Otvrđnjavanje brušenjem .....	26
7. IZVEDBE HIBRIDNIH OBRADNIH STROJEVA .....	28
7.1. LASERTEC 65 3D.....	28
7.2. INTEGRIX I-400 AM.....	31
7.3. Ultrasonic 10 .....	32
7.4. Ultrasonic 20 linear .....	33
7.5. Ultrasonic mobileBlock .....	35
8. ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA.....	39

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Usporedba trošenja alata konvencionalne obrade i obrade sa UPG-om [6].....	5
Slika 2.	Utjecaj konvencionalnog alata na kompozite građene od slojeva [4].....	6
Slika 3.	Shematski prikaz ultrazvukom potpomognutog brušenja (lijevo) i tokarenja (desno) [9] .....	12
Slika 4.	Prikaz pukotina uzrokovanih vibracijama na keramičkim materijalima [9] .....	12
Slika 5.	Shema obrade potpomognute laserom [3].....	13
Slika 6.	Djelovanje lasera na površinu materijala [9].....	14
Slika 7.	Princip stvaranja hidrodinamičkog klina u zoni dodira alata i obratka [10] .....	15
Slika 8.	Utjecaj tlaka rashladnog sredstva na odvojenu česticu Inconela 718 [9].....	16
Slika 9.	Smještaj mlaznica za dovod tekućeg CO <sub>2</sub> i sekundarnog rashladnog sredstva [10] .....	18
Slika 10.	Usporedba trošenja stražnje površine alata kod konvencionalnog i kriogenog glodanja [10].....	19
Slika 11.	Prikaz alata AWEDM postupka (lijevo) i usporedba integriteta površine između WEDM-a i AWEDM-a (desno) [9].....	21
Slika 12.	Rotacijski EDM postupak [9].....	21
Slika 13.	Princip rada ECM postupka i mehaničke obrade odvajanjem [13].....	22
Slika 14.	Princip rada ECDM-a [14].....	23
Slika 15.	Postupak laserskog oblaganja [15] .....	24
Slika 16.	Sustav za koaksijalni dovod materijala (lijevo) i bočni dovod materijala (desno) [16] .....	25
Slika 17.	Obrada brusnim otvrdnjavanjem tankostjenih cilindričnih obradaka [18].....	27
Slika 18.	Rezultati rasporeda tvrdoće po poprečnom presjeku za brusno otvrdnjavanje [9].....	27
Slika 19.	Hibridni obradni stroj LASERTEC 65 3D [19] .....	28
Slika 20.	Kučište turbine .....	29
Slika 21.	Hibridni obradni stroj INTEGREG I-400 AM [20] .....	31
Slika 22.	„Fina“ i „visokobrzinska“ laserska glava [15].....	32
Slika 23.	Hibridni obradni stroj Ultrasonic 10 [21].....	33
Slika 24.	Hibridni obradni stroj Ultrasonic 20 linear [22] .....	34
Slika 25.	Unutarnje i vanjsko brušenje potpomognuto ultrazvukom rotaciono simetričnih dijelova [22] .....	35
Slika 26.	Hibridni obradni stroj Ultrasonic mobileBlock [23] .....	35
Slika 27.	Vakuumski sustav prilagodljivih nožica [23] .....	36
Slika 28.	Upravljačko računalo stroja Ultrasonic mobileBlock [23].....	37
Slika 29.	Prikaz pozicioniranja stroja uz pomoć kрана u zrakoplovnoj (lijevo) i automobilskoj industriji (desno) [23] .....	37

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Klasifikacija hibridnih procesa [9] ..... 10  
Tablica 2. Koraci obrade kombinacijom laserskog oblaganja i glodanja kućišta turbine [19]  
..... 30



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
A	$\mu\text{m}$	Amplituda
AWEDM	/	Abrasive Wire Electrical Machining
BUE	/	Build-Up Edge
CIRP	/	College International Pour la Recherche en productique
CSA	/	Cryogenic Society of America
$E_u$	$\text{J}/\text{cm}^2$	Gustoća energije
ECDM	/	Electrochemical Discharge Machining
ECM	/	Electrochemical Machining
EDM	/	Electrical Discharge Machining
f	kHz	Frekvencija
HPC	/	High Pressure Cooling
HRC	/	Tvrdoća po Rockwellu
MMC	/	Metal Matrix Composite
MQC	/	Minimal Quantity Cooling
MQCL	/	Minimum Quantity Cooling Lubrication
MQL	/	Minimal Quantity Lubrication
p	bar	Tlak
q	l/min	Protok
SHIP	/	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
T	K	Kelvin, jedinica temperature
U	V	Napon
UPG	/	Ultrazvukom podržano glodanje
$v_c$	m/min	Glavna brzina rezanja
WEDM	/	Wire Electrical Discharge Machining
$\vartheta$	$^{\circ}\text{C}$	Celzijev stupanj, jedinica temperature
$\omega$	$\text{min}^{-1}$	Frekvencija vrtnje

**SAŽETAK**

Pojavom novih, naprednih i teškoobradivih materijala sve je teže zadovoljiti potrebe tržišta obradom na konvencionalnim strojevima, a da se pritom zadrže niski proizvodni troškovi. Teškoobradivi materijali odlikuju se poboljšanim mehaničkim i toplinskim svojstvima zbog čega se smanjuje životni vijek reznog alata, a posljedično se povisuje cijena gotovoga proizvoda. Razvoj hibridnih obradnih strojeva je rješenje koje nudi bržu i ekonomičniju proizvodnju kompleksnih dijelova izrađenih od teškoobradivih materijala. Hibridni strojevi predstavljaju kombinaciju više različitih procesa obrade na jednoj obradnoj platformi radi povećanja učinkovitosti i produktivnosti uz postizanje visoke kvalitete proizvoda.

U ovom radu dan je literaturni pregled hibridnih procesa razvijenih za učinkovitu, brzu i ekonomičnu obradu teškoobradivih materijala te izvedbe hibridnih obradnih strojeva uz namjenu i opis mehanizama njihovoga rada.

Ključne riječi: teškoobradivi materijali, hibridni procesi obrade, povećanje ekonomičnosti i učinkovitosti, hibridni obradni strojevi

---

**SUMMARY**

With the emergence of new, advanced, and difficult-to-machine materials, it is becoming challenging to meet market demands through processing on conventional machines while keeping production costs low. Difficult-to-machine materials are characterized by enhanced mechanical and thermal properties, leading to a reduced lifespan of cutting tools and consequently increased price of the final product. The development of hybrid processing machines is a solution that offers faster and more economical production of complex parts made from difficult-to-machine materials. Hybrid machines represent a combination of multiple different machining processes on a single processing platform to increase efficiency and productivity while achieving high product quality.

This paper provides a literature review of hybrid processes developed for efficient, fast, and economical machining of difficult-to-machine materials, as well as the designs of hybrid processing machines along with descriptions of their operation mechanisms.

Key words: difficult-to-machine materials, hybrid machining processes, increased cost-effectiveness and efficiency, hybrid processing machines

## 1. UVOD

U suvremenome svijetu razvoj i napredak tehnologije očituje se u svakodnevnome životu te ga na neki način i oblikuju. Može se reći da svaki novi dan donosi alternativne razvojne koncepte i otkrića koja će uvelike utjecati na život u budućnosti. Promjene se događaju u svim područjima ljudske djelatnosti, od načina gradnje građevina, preko elektroindustrije pa sve do razvoja same proizvodnje i alatnih strojeva koji čine srž svega ostalog. Alatni strojevi su strojevi koji služe za obradu i izradu pojedinih dijelova svih ostalih strojeva i uređaja, ali su i jedini strojevi koji mogu izrađivati sami sebe [1]. Najprije su se pojavili kao ručno upravljivi, pa su postepeno doživjeli razvitak u automatski i numerički upravljive strojeve, a danas sve više teže k autonomnosti i visokom stupnju automatizacije. Suvremeno konkurentno tržište iziskuje bržu proizvodnju uz što manji gubitak vremena te potrebu za velikom fleksibilnošću strojeva, odnosno što bržu reakciju stroja na zahtjeve samog tržišta [1]. Uz sve to stroj mora biti ekonomičan i siguran za okolinu, a ponajprije za samog čovjeka.

Uz kompleksno tržište, strojevi su primorani napredovati zbog sve veće pojave novih, naprednih, teškoobradivih materijala koji su zahtjevniji za obradu te ih je nemoguće kvalitetno obraditi pomoću dosadašnjih „tradicionalnih“ obradnih postupaka poput tokarenja, glodanja, brušenja i slično. Rješenje problema obrade takvih materijala uz zadržavanje konkurentnosti na tržištu je pojava i razvoj hibridnih alatnih strojeva.

Hibridni procesi obrade su kombinacija dvaju ili više različitih postupaka obrade koje se vrše na jednoj zajedničkoj platformi, odnosno na hibridnom alatnom stroju. Svrha razvoja hibridnih procesa je povećanje prednosti pojedinačnih alatnih strojeva, uz istovremeno smanjenje njihovih nedostataka [2]. Ujedinjenjem više konvencionalnih i/ili nekonvencionalnih postupaka na jednom stroju znatno se skraćuje vrijeme potrebno za izradu pojedinog dijela što utječe na povoljniju cijenu proizvoda te takvi strojevi pružaju mogućnost obrade teškoobradivih materijala.

U nastavku rada dan je pregled najpoznatijih teškoobradivih materijala, hibridnih procesa razvijenih za njihovu obradu, kombinacije postupaka koje se danas koriste te izvedbe i karakteristike hibridnih strojeva.

## 2. TEŠKOOBRADIVI MATERIJALI

Novi, napredni materijali poput super legura na bazi titana i nikla, željeznih legura, keramike, kompozita te legura kobalta i kroma razvijene su s ciljem postizanja visoke čvrstoće, površinske tvrdoće i otpornosti na povišene temperature pronašli su svoju primjenu u automobilskoj, zrakoplovnoj, nuklearnoj, medicinskoj i elektronskoj industriji. Ove materijale karakterizira izvanredni odnos čvrstoće i težine (eng. „strength-to-weight ratio“), dobra otpornost na koroziju te mogućnost zadržavanja mehaničkih svojstava pri visokim temperaturama. Svi navedeni materijali imaju izrazito visoku čvrstoću i žilavost u usporedbi s konvencionalnim inženjerskim materijalima [3].

Sam naziv „teškoobradivi“ nastao je tijekom obrađivanja takvih novih materijala na suvremenim strojevima korištenjem istih postupaka kojima se obrađuju konvencionalni materijali poput čelika. Problemi koji se pojavljuju utječu na ukupnu cijenu gotovog proizvoda, a ponajviše se tiču trošenja alata, malih posmaka i malih dubina rezanja što utječe na trajanje samog procesa obrade. Najveći uzroci trošenja samog alata jesu oslobađanje velikih količina topline u smičnoj zoni, na prednjoj površini alata i na stražnjoj površini alata, velika količina trenja između alata i odvojene čestice, tendencija stvaranja naljepaka (BUE) na vrhu oštrice zbog malih brzina rezanja te katastrofalno stvaranje pukotina na vrhu rezne oštrice [3, 4]. Drugim riječima, teškoobradivi materijali imaju slabu obradivost. Obradivost je osnovna tehnološka karakteristika materijala kojom se izražava njegova pogodnost za obradu, a procjenjuje se skupom kriterija obradivosti ili funkcija obradivosti [4]. Teškoobradivi materijali zbog osobina koje posjeduju i slabe obradivosti nisu pogodni za konvencionalnu obradu odvajanjem čestica poput glodanja ili tokarenja jer će takva proizvodnja biti neekonomična. U nastavku biti se detaljnije objašnjene najzastupljenije skupine novih materijala.

### 2.1. Legure na bazi titana

Titan je zanimljiv materijal zbog velike specifične čvrstoće, izrazito dobre korozijske postojanosti i sposobnosti zadržavanja svojstava pri povišenim temperaturama. Koristi se u zrakoplovnoj, automobilskoj i posebno u medicinskoj industriji zbog izrazito dobre kompatibilnosti s ljudskim tijelom. Razvijen je veliki broj različitih legura na bazi titana, no sve one se mogu podijeliti u tri veće skupine,  $\alpha$ -legure,  $\beta$ -legure i  $\alpha + \beta$  legure. Svojstva tih legura ovise o njihovoj mikrostrukturi i termomehaničkoj obradi [5]. Kombinacija tih svojstava zajedno s malim modulom elastičnosti, malom toplinskom vodljivošću i sklonosti stvaranju spojeva s drugim elementima čini ga izrazito teškim za obradu [3].

Neka istraživanja su pokazala da obrada titana i legura na bazi titana bez upotrebe SHIP-a i uz značajno sniženje temperature na kojoj se vrši obrada produljuje vijek trajanja rezne oštrice alata. Usporedbom kriogene i suhe obrade dokazano je da se kriogenom obradom postižu znatno veće prednosti nego suhom obradom i reznim alatom bez prevlaka. Jedna vrsta takvog hibridnog procesa obrade je kriogeno potpomognuta strojna obrada koja uz dulji vijek trajanja alata omogućuje veće brzine rezanja. Dokazano je da kombinacija malog posmaka i velike dubine rezanja pri konstantnoj brzini rezanja od 125 m/min s korištenjem tekućeg dušika kao sredstva za hlađenje produljuje vijek trajanja reznog alata do šest puta u usporedbi s obradom gdje se koristi kombinacija velikog posmaka i male dubine rezanja uz iste ostale uvjete obrade [3].

Dakle, kombinirani procesi, odnosno hibridni procesi obrade titana poput kriogeno potpomognute strojne obrade uvelike produljuju vijek trajanja alata, omogućava veće brzine rezanja te tako omogućuju ekonomičniju i bržu obradu.

## **2.2. Legure na bazi nikla**

Nikal je metal koji se često koristi u različitim industrijskim sektorima pa tako i u strojarstvu. Jedan je od elemenata koji se često dodaje kao legidni element različitim čelicima ili drugim legurama zbog svojih iznimnih svojstava poput visoke vatrootpornosti, antikorozivne zaštite te povećanja čvrstoće.

Legure na bazi nikla su napredni materijali koji uključuju nikal kao glavni element uz različite primjese drugih metala. Legure poput Inconela, Hastelloya, Waspalloya, i Udimeta su često korišteni materijali u zrakoplovnoj i nuklearnoj industriji gdje se koriste u izradi plinskih turbina, mlaznih turbina i potisnih spremnika zbog pogodnih kemijskih i mehaničkih svojstva [3].

Obradivost nikla je otežana zbog visokih temperatura u zoni rezanja koje dostižu 1200 °C, kemijske reaktivnosti s velikom većinom elemenata u suvremenim reznim alata te zbog velike količine tvrdih uključaka poput TiC, CrC, MoC koji djeluju abrazivno na rezni alat [3]. Povećanje obradivosti nikla može se postići hibridnim procesom obrade koji uključuje rezanje laserom i naknadnim glodanjem. Inconel, kao najčešća legura, služiti će dalje za opisivanje jedne vrste hibridne obrade.

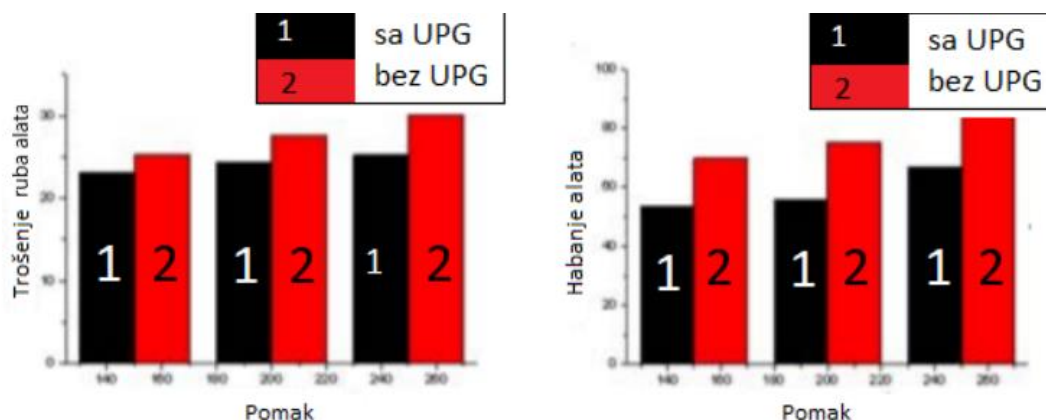
U prethodnim godinama, laserom potpomognuta obrada legura na bazi nikla iskorištena je za moguće poboljšanje obradivosti nikla. Tvrdoća Inconela opada iznad 600-700 °C te se iznad te temperature nalazi područje obrade materijala (eng. „material removal temperature“) [3]. Problem koji se prvotno pojavio kod Inconela je slaba apsorpcija energije iz lasera i

nemogućnost podizanja temperature nikla. Anderson i ostali (2006.) su dokazali da se apsorpcija energije lasera kod nikla može povećati korištenjem grafitnog ljepila na obratku i korištenjem CO<sub>2</sub> lasera, no problem se pojavio kod oštih rubova gdje je sloj adheziva bio puno tanji i nije se mogla postići željena temperatura u jednom prolazu lasera [3]. Daljnjim provođenjem eksperimenata zaključeno je da se najoptimalnija obrada postiže uz korištenje optimalne brzine rezanja, lasera velike snage, malog promjera laserske zrake, manjeg posmaka i duljeg vremena predgrijavanja. Uz sam laser, bitan je i rezni alat koji se koristi u obradi Inconela s ciljem postizanja zadovoljavajuće hrapavosti uz visoku trajnost. Usporedbom korištenja keramičkog alata umjesto karbidnog alata nisu dobiveni željeni rezultati trajnosti oštrice i površinske hrapavosti iako je keramički alat znatno skuplji. Unatoč navedenom, Attia i ostali (2010.) dokazali su da je najoptimalnija obrada sa Sailon keramičkim reznim alatom koji radi završni prolaz nakon obrade laserom te je eksperimentom utvrđeno da takav alat omogućuje povećanje brzine rezanja do 800% uz dulji vijek trajanja alata u odnosu na konvencionalne alate u točno određenim uvjetima rada [3].

### **2.3. Keramika**

Jedan od najpoznatijih naprednih materijala je keramika. Atraktivna svojstva poput visoke tvrdoće, male gustoće, slabe toplinske vodljivosti, električke izolacije te otpornosti na koroziju i toplinu, vrlo brzo su doprinijeli popularnosti keramike u suvremenoj industriji za izradu dijelova visoke čvrstoće izloženih teškim uvjetima rada. Uz nabrojane prednosti, keramika ima određene izazove poput lomljivosti i poteškoće u obradi što ju čini izrazito zahtjevnim materijalom za obradu. Kod konvencionalne obrade keramike, ona često izaziva ubrzano trošenje alata i samim time smanjuje učinkovitost i povisuje troškove rada. Jedno od rješenja za obradu keramičkih dijelova je hibridni postupak ultrazvukom podržanog glodanja (UPG-a) koji je detaljnije objašnjen u nastavku rada.

Zbog izrazito visoke tvrdoće i slabe toplinske vodljivosti dolazi to oslobađanja velikih količina topline na dodiru alata i materijala te dolazi do pojave velikih sila rezanja što pospješuje trošenje alata. Istraživanja su pokazala da korištenje UPG-a doprinosi smanjenju temperature i reznih sila zbog manjeg kontaktnog trenja između alata i obratka. Slika 1 pokazuje trošenje vrha i habanje alata u usporedbi obrade sa i bez UPG-a, pri korištenju reznog fluida topivog u vodi [6].



Slika 1. Usporedba trošenja alata konvencionalne obrade i obrade sa UPG-om [6]

Lijevi dijagram prikazuje trošenje vrha alata, a desni dijagram prikazuje habanje alata s obzirom na obradu sa i bez UPG-a. Iz oba dijagrama može se iščitati da je trošenje smanjeno kod ultrazvukom podržanog glodanja. Što je veći posmak, veća je i razlika u trošenju alata, a UPG-om se može postići čak do 20% produljenoga vijeka trajanja alata u odnosu na konvencionalno glodanje keramičkih materijala.

#### 2.4. Kompoziti

Kompozitni materijali su materijali koji su sastavljeni od dvaju ili više različitih komponenti koje imaju određena svojstva, a zajedno tvore materijal kombiniranih, poboljšanih svojstava. Najčešće se sastoje od matrice koja čini bazu materijala, a karakterizira ju žilavost i različitih vlakana ili disperziranih čestica koje doprinose svojstvima poput čvrstoće i krutosti. Kompoziti se mogu klasificirati u četiri veće grupe [7]:

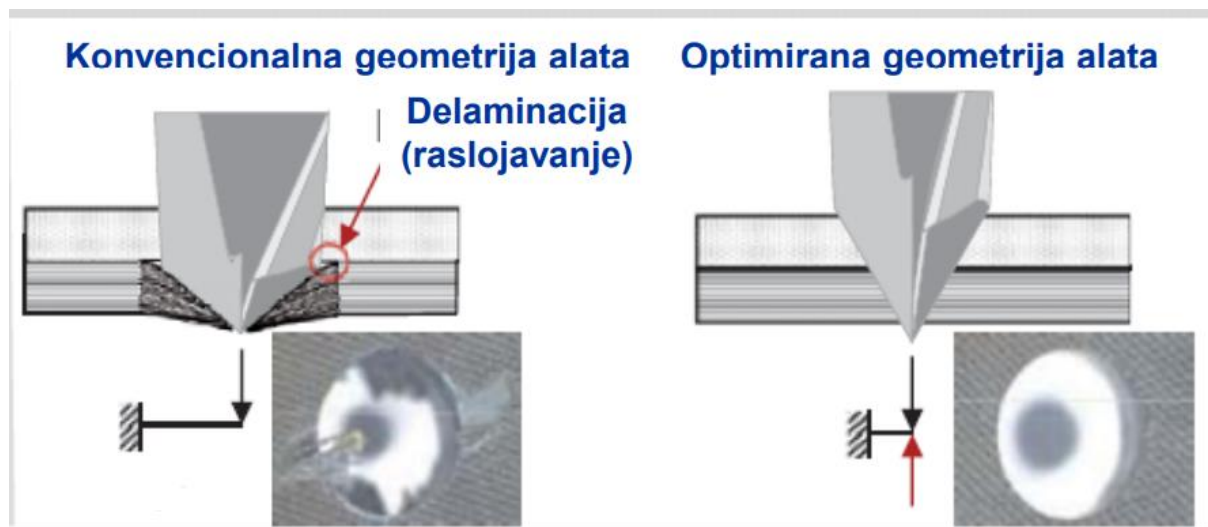
1. Kompoziti građeni od čestica
2. Kompoziti građeni od vlakana
3. Kompoziti građeni od slojeva
4. Kombinirani ili hibridni kompoziti

Kompoziti se zbog velikog broja mogućih kombinacija svojstva mogu koristiti u svim područjima ljudske djelatnosti, a najviše se koriste u automobilske industriji, za izradu dijelova formula i bolida, zrakoplovnoj industriji, arhitekturi, brodogradnji te vojnoj industriji.

Obrada kompozitnih materijala je zahtjevna jer materijal nije homogen, sastoji se od slojeva koji imaju različita fizikalna i kemijska svojstva. Zahtjevno je obraditi takav materijal jednom vrstom obrade. Primjer je dan slikom 2 koja prikazuje bušenje različitih slojeva unutar



kompozitnog materijala te nemogućnost potpunog prolaza jednim konvencionalnim svrdlom, a da pritom ne dođe do narušavanja strukture materijala.



**Slika 2. Utjecaj konvencionalnog alata na kompozite građene od slojeva [4]**

Izvlačenje vlakna, raslojavanje, kontinuirana vlakna koja se protežu kroz materijal, visoko dimenzijsko odstupanje te visoka hrapavost površine su izazovi koji se javljaju kod strojne obrade kompozitnih materijala [3]. Hibridni procesi jedino su moguće rješenje za kvalitetnu obradu kompozita uz osiguranje produktivnosti, učinkovitosti i očuvanja reznog alata. U nastavku je iznesen kratak pregled usporedbe hibridne obrade ultrazvučno potpomognutog tokarenja s konvencionalnim tokarenjem kompozita s aluminijskom metalnom matricom (MMC) ojačanog česticama silicijevog karbida.

Kompozit aluminijske metalne matrice ojačan disperziranim česticama silicijevog karbida idealan je za izradu dijelova u zrakoplovnoj industriji zbog poboljšanih termo-mehaničkih svojstava. Konvencionalna obrada takvog kompozita je otežana zbog izuzetno visoke čvrstoće što je dovelo do razvitka novog hibridnog procesa, odnosno ultrazvukom potpomognutog tokarenja [8]. Uz povećanje produktivnosti, povećava se i kvaliteta obrađene površine obratka. Provođenjem eksperimenta konvencionalnog tokarenja kompozita u usporedbi s potpomognutim tokarenjem dobivaju se konkretni rezultati. Eksperiment se provodi na tokarilici Harrison M300 modificiranom na način da se napravio jedan nosač za ultrazvučni pretvarač koji se postavio oko nodalne ravnine i pričvrstio se vijcima na vertikalni klizač. Alat kojim se vršila obrada je izrađen od volfam karbida s TiAlN premazom proizvođača Sandvik Coromant uz konstantu brzinu rezanja, posmak i dubinu rezanja. Rezultatima eksperimenta zaključeno je da kod ultrazvukom potpomognutog tokarenja postignuto smanjenje sila rezanja

od 68% u tangencijalnog smjeru te 66% u radijanom smjeru rezanja, a površinska hrapavost je smanjena za 44% [8].

Hibridna obrada kompozita u većini slučajeva je nužna jer se jedino tako možemo prilagoditi specifičnim zahtjevima materijala, a kako postoji mnoštvo različitih kompozita, postupno se razvija i velik broj različitih izvedbi hibridnih strojeva.

## 2.5. Željezne legure

Željezne legure predstavljaju široku skupinu materijala koje karakterizira željezo kao glavni element uz najčešći dodatak i gotovo neizostavan element ugljik. Čelik je najpoznatija i najraširenija željezna legura koja sadrži najčešće od 0,2% do 2,1% ugljika ovisno o namjeni čelika te se nalazi gotovo svugdje oko nas. Niskougljični duktilni čelici, nehrđajući čelici i kaljeni čelici svrstani su pod teškoobradive materijale na bazi željeza koji su našli primjenu u automobilske industriji za izradu dijelova poput zupčanika, koljenastih vratila i blokova motora [3]. Zbog povećane čvrstoće i žilavosti takvi materijali su zahtjevni za obradu. Uz navedene, teškoobradivi su i visokolegirani čelici s različitim primjesama za poboljšanje svojstava, nehrđajući martenzitni čelici te nodularni ljevovi s legidnim elementima titana i volframa. Postoje i čelici koji imaju tvrdoću veću od 45 HRC koji se najčešće obrađuju tzv. tvrdim tokarenjem alatom koji ima negativan prednji kut pri malim brzinama rezanja.

Teškoobradive željezne legure mogu se obrađivati hibridnim postupcima brušenja i bušenja potpomognutima ultrazvukom za povećanje preciznosti i kvalitete obrađene površine, kombinacijom glodanja i aditivne proizvodnje za izradu dijelova složene geometrije, kombinacijom elektroerozije i brušenja za precizno oblikovanje legura, glodanjem potpomognutim ultrazvukom za smanjenje sila rezanja i povećanje radnog vijeka alata te rezanjem laserom ili vodenim mlazom za minimalne termičke deformacije.

Što se tiče zahtjevnosti za obradu, željezne legure nisu na istoj razini poput ostalih teškoobradivih materijala. One su najstarije i još uvijek među najpopularnijim legurama korištenim u strojarstvu i u drugim industrijama. Konvencionalna obrada daje zadovoljavajuće rezultate za obradu željeznih legura, ali se hibridnim procesima ostvaruju poboljšanja i povećanja točnosti za visokozahtjevna područja primjene.

### 3. HIBRIDNI PROCESI I NJHOVA KLASIFIKACIJA

Hibridni procesi obuhvaćaju široko područje interpretacija s različitih stajališta i teško je izdvojiti jedinstvenu definiciju koja bi univerzalno opisivala takve postupke. Prema K. P. Rajurkuru (1999.) hibridnim se procesima nazivaju oni procesi koji se pojavljuju kao kombinacija dvaju ili više različitih postupaka skidanja materijala s obratka [3]. Takva je predodžba o hibridnim procesima preopširna i nedovoljno precizna. Kroz pregled povijesnog razvoja hibridnih procesa, može se izdvojiti nekoliko koncepcija iz literature. Podrobniji opis iznesen je od strane Aspinwalla (2001.) koji navodi da postoje dva različita pristupa prema kombiniranim operacijama. Prvi pristup se odnosi na hibridne procese i opisuje ih kao kombinaciju različitih postupaka obrade, kojom se izvode dva ili više procesa obrade na jednome stroju te takvi postupci ne ovise jedan o drugome i obratno. Drugi pristup odnosi se na potpomognutu strojnu obradu prema kojoj se dva ili više procesa izvode simultano na jednome stroju [3]. Sličnu definiciju iznose Menzies i Koshy (2008.) koji objašnjavaju hibridne procese kao kombinaciju dvaju ili više postupka koji skidaju materijal s obratka na različite načine [1]. Za bolje razumijevanje, primjer hibridnog procesa može biti glodanje u kombinaciji s laserom, a potpomognuta obrada bi obuhvaćala bušenje potpomognuto vibracijama.

Alternativno s drugih stajališta, Rivette (2007.) iznosi definiciju orijentiranu na izradu prototipa kako bi hibridne procese obrade poistovjetio s izradom prototipova, koji najčešće nastaju kombinacijom rapidnog i konvencionalnog postupka izrade prototipa. S obzirom na potrošnju energije, Klocke (2010.) i Nau (2011.) hibridne procese definiraju kao postupak primjene različitih oblika energije ili oblika energije nastalih ih drugačijih izvora korištenih u isto vrijeme na istom mjestu, odnosno u istoj zoni utjecaja [3].

S obzirom na mnoštvo različitih definicija, CIRP (eng. „International Academy for Production Engineering“) predlaže tri univerzalne definicije koje opisuju hibridne procese u potpunosti [3]:

1. Integrirana primjena ili kombinacija različitih fizički aktivnih mehanizma, pr. laserom potpomognuto glodanje
2. Integrirana kombinacija uobičajeno zasebno izvedenih procesa, pr. oblikovanje rastezanjem i inkrementalno oblikovanje lima
3. Integrirani strojevi, pod nazivom hibridni strojevi, sposobni obavljati više različitih procesa obrade na jednom mjestu, pr. kombinirano glodanje i tokarenje

Zaključno sa svime, najpotpuniji opis koji proizlazi iz gore navedenih definicija daje konačnu zaokruženu cjelinu hibridnih procesa. Prema CIRP-u (2011.), hibridni su procesi [3]:

- a) Široka definicija: kombinacija dva ili više poznata, uhodana obradna postupka koja zajedno čine novi povezani postav prema kojem se prednosti svakog diskretnog postupka mogu iskoristiti sinergijski;
- b) Uska definicija: obuhvaćaju istovremeno djelovanje različitih (kemijski, fizikalni, kontrolirani) principa obrade na istoj, zajedničkoj obradnoj jedinici.

### 3.1. Klasifikacija hibridnih procesa

Hibridni se procesi mogu podijeliti u dvije glavne skupine s pripadajućim podskupinama [9]:

1. Kombinacija različitih izvora energije, odnosno različitih alata
  - a. Potpomognuti hibridni procesi
  - b. Kombinirani hibridni procesi
2. Kontrolirana primjena procesnih mehanizama

Prva skupina obuhvaća kombinaciju različitih izvora energije, odnosno alata koji imaju sinergijski učinak u zoni obrade. Daljnja podjela unutar skupine dijeli se na potpomognute hibridne procese i na kombinirane hibridne procese [9]. Potpomognuti hibridni procesi odnose se na kombinaciju različitih tehnika obrade od kojih je jedna tehnika primarna i ona određuje način obrade, a ostali postupci služe kao pomoć primarnom procesu. U potpomognute hibridne procese spadaju i procesi obrade potpomognuti medijima poput visokotlačnih mlaznih sustava za hlađenje i smanjenje sila rezanja te kriogenog hlađenja kod kojih je količina energije primijenjena za mlaz relativno visoka u usporedbi sa sredstvima za hlađenje, ispiranje i podmazivanje kod konvencionalnih postupaka. Kod kombiniranih hibridnih procesa sve su tehnike obrade od jednakog značenja, odnosno nema jednog primarnog procesa koji se izdvaja kao kod potpomognutih procesa. Dakle, kombinirani procesi obuhvaćaju nekoliko različitih poznatih mehanizama ili neke nove mehanizme obrade koji u međusobnoj ovisnosti istovremeno djeluju na materijal.

Druga glavna skupina odnosi se na kontroliranu primjenu procesnih mehanizama koja se odnosi na kombinaciju različitih procesa obrade koje se konvencionalno pojavljuju samostalno [9]. Primjer jednog takvog procesa je kombinacija brušenja i zakaljivanja kod koje se prvotno obratku brušenjem skida materijal, a naknadno dolazi do zakaljenja zbog generirane topline na površini obratka. Kontrolirana primjena procesnih mehanizama obuhvaća kombinaciju procesa koji najčešće vrše obradu jedan iza drugog, a ne istovremeno po čemu se i razlikuje od kombiniranih hibridnih procesa.

U tablici 1 dan je pregled klasifikacije hibridnih procesa obrade. Današnje izvedbe i kombinacije različitih procesa obrade te njihova namjena biti će detaljnije objašnjeni u nastavku rada.

**Tablica 1. Klasifikacija hibridnih procesa [9]**

<b>HIBRIDNI PROCESI</b>		
<b>Kombinacija različitih izvora energije/ alata</b>		<b>Kontrolirana primjena procesnih mehanizama</b>
<b>Potpomognuti procesi</b>	<b>Kombinirani procesi</b>	
Obrada potpomognuta vibracijama	Obrada odvajanjem i elektroerozija (EDM)	Lasersko oblaganje i glodanje
Obrada potpomognuta laserom	Obrada odvajanjem i elektrokemijska obrada (ECM)	Elektrolučno navarivanje i obrada odvajanjem
Medijem potpomognuta obrada	Kombinacija elektrokemijske obrade i elektroerozije (ECM i EDM)	Otvrdnjavanje brušenjem

## 4. POTPOMOGNUTI HIBRIDNI PROCESI OBRADE

Potpomognuti hibridni procesi obrade sastoje se od dva ili više mehanizma obrade od kojih je jedan mehanizam primarni i kao takav određuje vrstu i način obrade. Svi ostali mehanizmi služe kao pomoć primarnom procesu za olakšanje obrade teškoobradivih materijala.

### 4.1. Obrada potpomognuta vibracijama

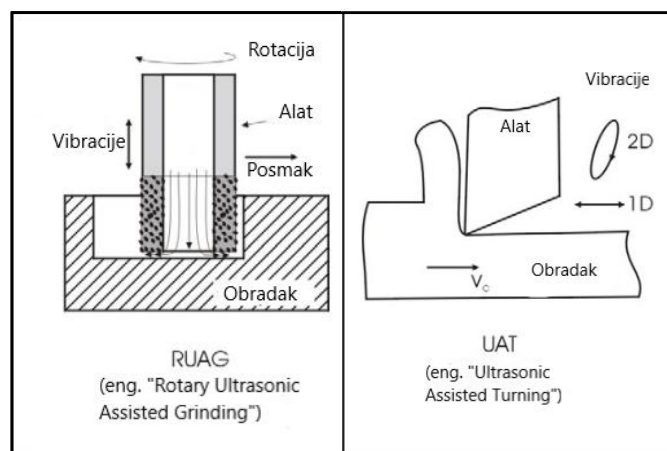
Strojna obrada potpomognuta vibracijama je vrsta hibridne obrade kod koje se istovremeno primjenjuje mehanička obrada rotacijom vretena i najčešće ultrazvučna vibracija pomoću visokih frekvencija aksijalne ultrazvučne oscilacije reznog alata ili obratka [2]. Kod strojne obrade potpomognute vibracijama, vibracije male amplitude (u prosjeku veličine amplitude između 1 i 15  $\mu\text{m}$  na frekvenciji između 10 i 80 kHz) dodaju se kretanju alata ili obratka. Vibracije se generiraju u jednom ili dva smjera, a u slučaju dvosmjernog generiranja dolazi do eliptičnog gibanja [10]. U većini sustava vibracija se nalazi u području ultrazvučnog frekvencijskog raspona, između 18 i 25 kHz, zbog čega se za takvu vrstu obrade često koristi naziv ultrazvukom potpomognuta obrada. Vibraciju generira piezoelektrični uređaj koji se najčešće nalazi unutar kućišta glavnog vretena ili držača alata. S obzirom na vrstu primarnog procesa, možemo podijeliti obradu potpomognutu vibracijama na [9]:

1. Tokarenje potpomognuto vibracijama,
2. Glodanje potpomognuto vibracijama,
3. Bušenje potpomognuto vibracijama,
4. Brušenje potpomognuto rotacijskim ultrazvukom.

Glavna namjena korištenja vibracija je smanjenje reznih sila što posljedično utječe na duži vijek trajanja alata, smanjena je sklonost pojavi srha, olakšan je lom čestice, omogućava obradu žilavih materijala poput niskolegiranih željeznih legura, obradu krhkih i tvrdih materijala poput keramike te za obradu ostalih teškoobradivih materijala.

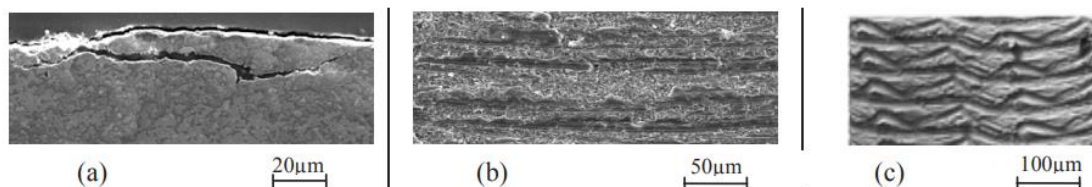
Vibracije bi trebale biti primijenjene u odgovarajućem smjeru, a najčešće je to smjer glavnog gibanja pri rezanju. Kod aluminijskih legura i kompozita s metalnom matricom na bazi aluminijske utvrđuje se da vibracija ima pozitivan utjecaj na obradu samo ako ne djeluje u radijnom smjeru. Isto se može vidjeti kod brušenja potpomognutog vibracijama, shematski prikazanog slikom 3 (lijevo), u slučaju obrade silicija gdje aksijalna vibracija, vibracija čije je kretanje paralelno s radnom površinom ili duž osi brusne ploče, daje bolju površinsku hrapavost [9]. Kod tokarenja potpomognutog vibracijama, shematski prikazanog slikom 3 (desno), krhkih

materijala poput keramike i stakla obrada je kvalitetnija ako se za dubinu rezanja uzmu manje vrijednosti te je rezultat takve obrade površina bez pukotina i lomova.



**Slika 3. Shematski prikaz ultrazvukom potpomognutog brušenja (lijevo) i tokarenja (desno) [9]**

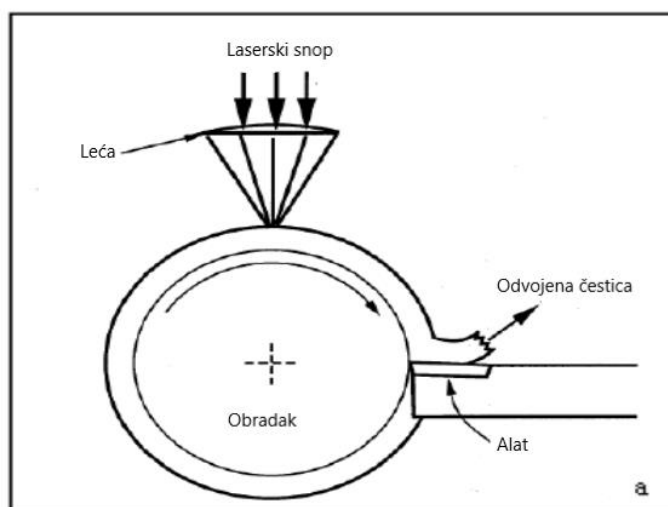
Utjecaj vibracija na obradu nije uvijek pozitivan. Kod obrade džepova brušenjem potpomognutim rotacijskim ultrazvukom, vibracija koja djeluje duž smjera alata može pospješiti nastajanje površinskih pukotina zbog udaranja alata. Na slici 4 a) dan je prikaz pukotina nastalih zbog učestalih udara brusne ploče po uzorku izrađenom od aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [9]. Što se tiče krhkih materijala općenito, površinske teksture prikazuju da zbog vibracija dolazi do otkinuća krhkih komadića s površine obratka te tako dolazi do povećanja površinske hrapavosti što se vidi na slici 4 b). Još jedan primjer lošeg utjecaja vibracija je obrada cirkonijskog oksida ( $\text{ZrO}_2$ ), najtvrdog keramičkog materijala, kod kojeg dolazi do smanjenja sile rezanja, ali istodobno do jako velike površinske hrapavosti što je prikazano slikom 4 c) [9]. Često se zbog navedenih loših utjecaja vibracija na hrapavost, za finu završnu obradu one ne koriste.



**Slika 4. Prikaz pukotina uzrokovanih vibracijama na keramičkim materijalima [9]**

## 4.2. Obrada potpomognuta laserom

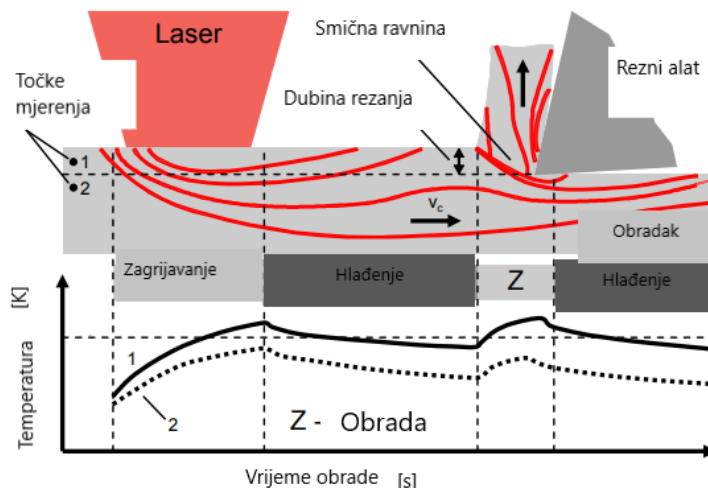
Strojna obrada potpomognuta laserom predstavlja hibridnu metodu u kojoj se koristi laser velike snage kao dodatak konvencionalnim postupcima obrade radi postizanja određenih prednosti. Pri povišenim temperaturama, granica tečenja krtog materijala smanjuje se ispod čvrstoće loma mijenjajući tako deformacijsko ponašanje materijala od krtoga ka rastezljivom. Uz navedeno, na povišenim se temperaturama smanjuje granica razvlačenja čvrstog, duktilnog materijala čime se smanjuju sile rezanja i trošenje alata uz poboljšanje kvalitete površine [3]. Shematski prikaz obrade potpomognute laserom, točnije tokarenja, prikazan je na slici 5.



Slika 5. Shema obrade potpomognute laserom [3]

Kako lasersko rezanje omogućuje visoku preciznost bez pojave trošenja, rezultirajuća kombinacija strojne obrade i laserskog rezanja smanjuje trošenje alata što dovodi do povećane točnosti [2]. Prve primjene obrade potpomognute laserom pojavile su se kod tokarenja tvrdih materijala. Laserska zraka, usmjerena izravno ispred alata za rezanje, zagrijava i omekšava materijal do određene dubine te tako obrada postaje lakša, odnosno sile rezanja se smanjuju, a vijek trajanja reznog alata se produljuje što je prikazano slikom 6. Može se koristiti pri obradi kaljenih čelika gdje toplina koja dolazi s laserskih zraka omekšava površinski sloj pa prilikom rezanja umjesto krte nastaje duktilna deformacija [9].





Slika 6. Djelovanje lasera na površinu materijala [9]

Dva glavna laserska izvora koja se koriste u obradi potpomognutoj laserom su CO<sub>2</sub> laser i Nd: YAG laser [3]. Nd: YAG laser ima kraću valnu duljinu i bolju apsorpciju, dok CO<sub>2</sub> laser ima veću valnu duljinu i relativno niže troškove, no manje je učinkovit kod većine teškoobradivih materijala kao što su Inconel, kaljeni čelik i kompozitni materijali zbog slabe apsorpcije laserske energije [3].

U obradi kaljenih čelika zaostala naprezanja u materijalu, korištenjem lasera, postaju više vlačna nego tlačna i dubina prodiranja naprezanja postaje manja u usporedbi s konvencionalnim načinom obrade. Povišenje temperature uzrokovane djelovanjem lasera na materijal daje bolju hrapavost površine te ravnomjerniji raspored tvrdoće po površini. U usporedbi s konvencionalnim načinom obrade, plastično deformirani površinski sloj je dublji i jednoličniji. [9]

Obrada potpomognuta laserom primjenjuje se i u obradi keramičkih materijala koji imaju amorfne granične faze. Zagrijavanjem staklene faze koja okružuje kristale na temperaturu iznad 1000 °C rezultira smanjenjem otpornosti na deformaciju i lokalnog omekšanja materijala u zoni smicanja što omogućuje strojnu obradu keramike s geometrijski definiranim reznim rubom oštrice. Razni keramički materijali poput Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, ZrO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> koji imaju izrazito visoku tvrdoću i čvrstoću, pod uvjetom da sadrže neke amorfne faze, mogu se učinkovito i ekonomično strojno obraditi. [9]

Optimalno postavljanje obrade potpomognute laserom je vrlo zahtjevno zbog brojnih kontrolnih parametara poput snage lasera, promjera laserske zrake, brzine rezanja, posmaka i dubine rezanja te njihove međusobne ovisnosti [3]. Jedina mogućnost danas za to kako postaviti optimalne parametre takve vrste hibridne obrade je izvođenje eksperimenata i zaključivanje na temelju istih.

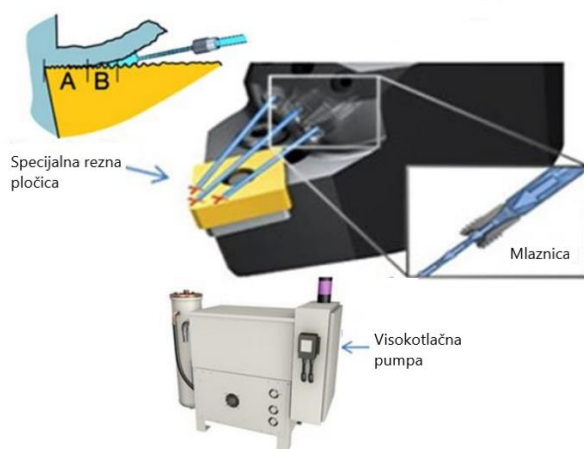
### 4.3. Medijem potpomognuta obrada

Medijem potpomognuta strojna obrada odnosi se na procese obrade materijala uz upotrebu različitih medija kod kojih je količina energije primijenjena za mlaz relativno visoka i/ili je način dovoda sredstva drugačiji od konvencionalnog, zbog čega ne pripadaju u klasičnu skupinu sredstava za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP). Medijem potpomognuta obrada dijeli se na tri osnovna tipa obrade [10]:

1. obrada uz uporabu sredstva pod visokim tlakom (HPC),
2. obrada uz primjenu minimalne količine maziva (MQL),
3. kriogena obrada.

#### 4.3.1. Obrada uporabom sredstva pod visokim tlakom (HPC)

Obrada uporabom stlačenog sredstva (HPC) odnosi se na proces obrade materijala koji uključuje upotrebu stlačenih tekućina ili plinova radi postizanja pogodnih rezultata obrade. Kako bi se dobila željena svojstva, dolazi do namjernog usmjeravanja stlačenog sredstva između prednje površine alata i odvojene čestice radi stvaranja hidrodinamičkog klina čime se pospješuje rezanje materijala [10]. Jedna od mogućih izvedbi je dovod sredstva kroz držač rezne pločice alata. Specijalan držač rezne pločice CoroTurn HP oblikovan je na način da ima tri kanala koji se protežu kroz držač i služe za dobavu rashladnog sredstva. Na kraju kanala se nalaze mlaznice kroz koje sredstvo izlazi ispred prednje površine reznog alata određenim tlakom. CoroTurn HP držači koriste se kod sustava za tokarenje i bušenje te se preporuča nabava sredstva pod tlakom između 70 i 80 bara za nehrđajuće čelike te između 150 i 200 bara za dupleks nehrđajuće čelike. Preporučeni protok je 20 l/min [10]. Princip rada alata s visokotlačnim mlazom prikazuje slika 7.

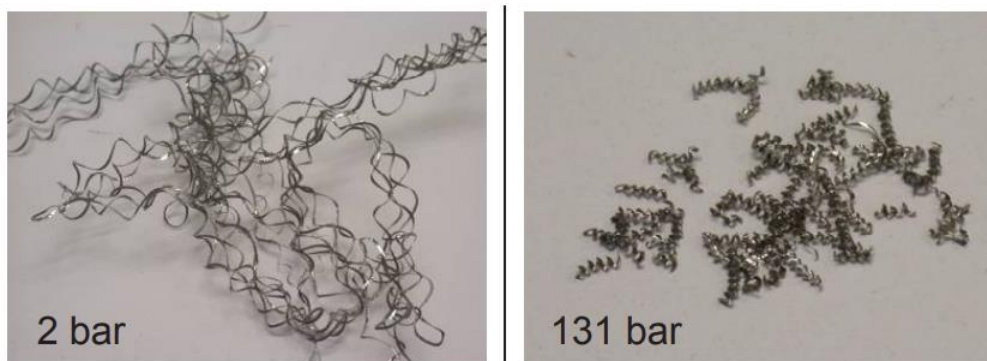


**Slika 7. Princip stvaranja hidrodinamičkog klina u zoni dodira alata i obratka [10]**

Unutar područja medijem potpomognute obrade, HPC je jedan od važnijih procesa za obradu legura na bazi titana i nikla za primjenu u zrakoplovstvu i pri izradi dijelova turbina, za obradu keramike, kompozitnih materijala te nehrđajućih čelika [9, 10]. Problem pri obradi takvih materijala je loša toplinska vodljivost što ustvari ubrzava trošenje alata. Brzina protoka i tlak stlačenog sredstva imaju značajan utjecaj na vijek trajanja i ponašanje alata, na oblik odvojene čestice te na mikrostrukturu obratka zbog značajne promjene temperature u vrlo kratkog vremenskom periodu [9, 10].

Legure povišene otpornosti na temperaturu mogu se obrađivati s većim brzinama rezanja uz zadržavanje površinskog integriteta zahvaljujući boljem odvođenju topline korištenjem stlačenog rashladnog sredstva. Kod obrade legiranih čelika, hrapavost površine se smanjuje s povećanjem pritiska vodenog mlaza te je pojava pukotina znatno manja. [9]

Obradom Inconela 718 dolazi do smanjenja zaostalih naprezanja koja se razvijaju ispod površinskog sloja što je posljedica niže temperature obrade. Trošenje alata kod obrade Inconela 718 može se smanjiti čak i do 350% tijekom završne obrade [9, 10]. Slika 8 prikazuje oblik i veličinu odvojene čestice kod obrade Inconela 718 u ovisnosti o promjeni tlaka.



**Slika 8. Utjecaj tlaka rashladnog sredstva na odvojenu česticu Inconela 718 [9]**

#### **4.3.2. Obrada uz primjenu minimalne količine maziva (MQL)**

Suha obrada materijala je nemoguća i neisplativa u mnogim postupcima odvajanja materijala rezanjem. Devedesetih godina prošloga stoljeća istraživanja smanjenja potrošnje sredstava za hlađenje i podmazivanje, prvenstveno radi sigurnosti radnika, dovela su do implementacije strojne obrade s minimalnom količinom maziva u rashladnoj tekućini, skraćeno MQL [10]. Valja naglasiti da ovisno o funkciji medija, koja primarno može biti podmazivanje ili hlađenje, uz MQL postoji i strojna obrada s minimalnom količinom rashladnog sredstva, skraćeno MQC,

kada je isporučena količina rashladne emulzije, vode ili zraka minimalna. U slučaju kad se obje funkcije sredstva koriste simultano, kao kod implementacije maglice za hlađenje i podmazivanje, koristi se termin obrada uz minimalno korištenje sredstva za hlađenje i podmazivanje, skraćeno MQCL [10].

Najčešće se u obradnim centrima protok rashladne tekućine za konvencionalnu obradu u prosjeku kreće između 20 i 100 l/h, dok kod MQL postupaka obrade protok iznosi između 0,03 i 0,20 l/h. Osnovna primjena MQL-a je za bušenje, razvrtanje, duboko bušenje, urezivanje navoja te za hladno oblikovanje navoja. Uz to, koristi se i kod obrade aluminijskih, čelika i sivog lijeva. Masni alkoholi i sintetički esteri su danas najzastupljenija maziva koja se dopremaju u obliku maglice ili pare. [10]

U sustavima s minimalnim podmazivanjem postoje dva načina na koji se može dopremiti sredstvo za podmazivanje i/ili hlađenje do same oštrice, a to su vanjsko i unutarnje dopremanje. U vanjskoj opskrbi, maglica se doprema kroz mlaznice koje se nalaze u neposrednoj blizini rezne oštrice, slično kao i kod HPC-a. Kod većih omjera duljine i promjera alata, približno kad je omjer  $L/d > 3$ , neophodno je dovoditi sredstvo kroz unutrašnjost samog alata, gdje imamo alate s jednim ili dva kanala dobave sredstva. Kao što je ranije spomenuto, u obradi teškoobradivih materijala u zrakoplovnoj industriji najkorišteniji je HPC, no sve više se počinje koristiti MQL zbog pozitivnih učinaka koje pruža, a ponajprije smanjenje toksičnog učinka na zdravlje radnika. [10]

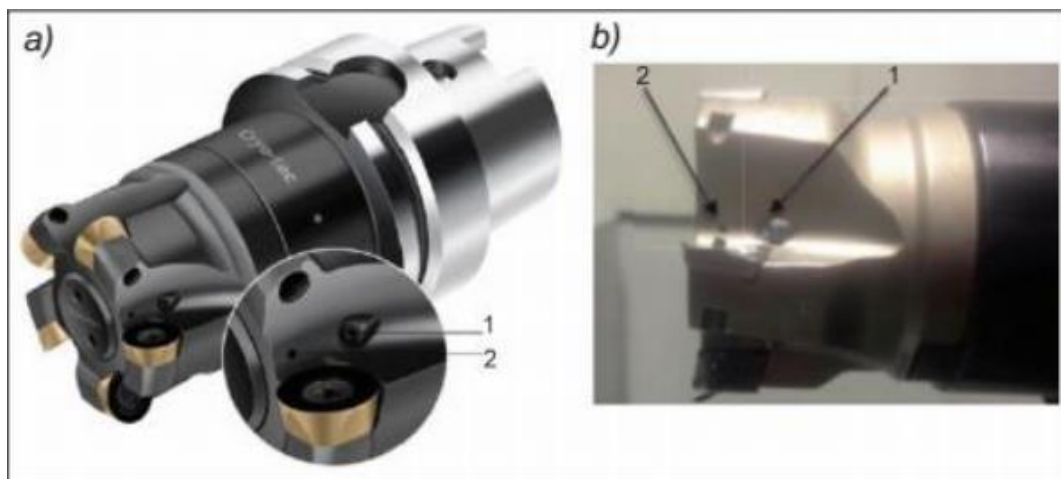
U novije vrijeme počinju se razvijati hibridne tehnike hlađenja u kojima je kriogena obrada potpomognuta MQL-om, odnosno mlaz tekućeg dušika ili tekućeg ugljikovog dioksida oblaže se uljnom maglicom.

### **4.3.3. Kriogena obrada**

Kriogena obrada svrstava se u skupinu procesa potpomognutih plinovitim medijima, ohlađenih do kriogenih temperatura. Pretpostavlja se da podrijetlo kriogenike odgovara temperaturi nižoj od  $-150\text{ °C}$  (123 K), iako Američko kriogeničko društvo (CSA) definira kriogeniku ispod temperature od  $-153\text{ °C}$  (120 K). Takva definicija kriogenike vezana je uz temperaturu znatno nižu od temperature vrelišta mnogih plinova poput helija, vodika, kisika, dušika i atmosferskog zraka. Tehnološki značajni kriogeni mediji su tekući dušik ( $\text{LN}_2$ ) s temperaturom od  $-186\text{ °C}$ , helij i tekući ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) s temperaturom od  $-50\text{ °C}$  do  $-78\text{ °C}$ . Toplinski učinak kriogene obrade mijenja svojstva materijala alata i materijala obratka u isto vrijeme. To se odnosi na produljenje vijeka trajanja alata, povećanu zamornu čvrstoću materijala, povećanu

otpornost na koroziju i abraziju te intenzivno odvođenje topline iz zone rezanja. Obrada potpomognuta kriogenim hlađenjem ima kombinaciju svojstava suhe strojne obrade i HCP-a. [10]

Kriogena obrada uporabom tekućeg ugljikovog dioksida kao medija temelji se na Joule-Thompsonovom efektu prema kojem dolazi do ključanja tekućeg CO<sub>2</sub> na temperaturi od -78,5 °C pri atmosferskom tlaku. Takvim efektom dolazi do stvaranja smjese pjenastog CO<sub>2</sub> (60%) i plina (40%). Tekući CO<sub>2</sub> je uskladišten u spremnicima pod tlakom od 50 bara. Do hlađenja dolazi zbog sublimacije kod izlaza CO<sub>2</sub> iz mlaznica zbog čega je bitno da su mlaznice smještene blizu zone dodira alata i obratka. Prikaz izvedbe takvih alata dan je na slici 9. Brojem „1“ označen je položaj mlaznice za dovod zraka, emulzije ili aerosola (MQL postupak). Broj „2“ označava mlaznicu koja služi za dovod kriogenog sredstva, u ovom slučaju tekućeg CO<sub>2</sub>, zbog čega je ta mlaznica smještena u neposrednoj blizini rezne oštrice. Ključan parametar efektivnog hlađenja je protok tekućeg CO<sub>2</sub>, a što je protok veći, bolje je hlađenje. [10]

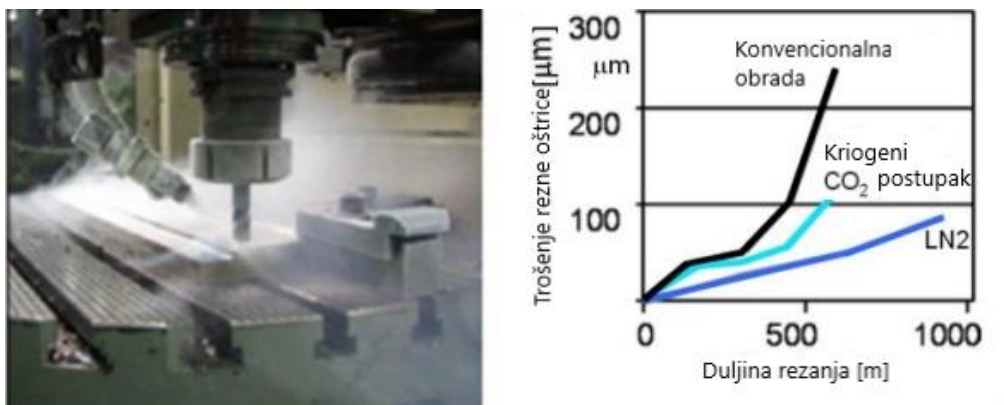


**Slika 9. Smještaj mlaznica za dovod tekućeg CO<sub>2</sub> i sekundarnog rashladnog sredstva [10]**

Kod kriogene obrade uporabom tekućeg dušika (N<sub>2</sub>) eksperimentalno je dokazano da doprinosi smanjenju trenja i stvaranju kratera na prednjoj površini alata te smanjenju plastične deformacije i abrazije na stražnjoj površini alata. Dominira u tvrdom tokarenju, no kod bušenja nailazi na probleme zbog poteškoća pri dovođenju tekućeg N<sub>2</sub> u zonu rezanja. U tokarenju se koristi i kod obrade duktilnih materijala i polimera (najčešće u mikroobradi) te takve materijale hlađenjem dovodi u krhko stanje radi povoljnije odvojene čestice. Razvija se i koncept obrade kod kojih se hladi samo odvojena čestica kako bi se pospješio njezin lom bez da se mijenja stanje materijala obratka. Obrađuju se legure na bazi titana i nikla, legure s prisjetljivosti oblika

(eng. „Shape Memory Alloys“), magnezijeve legure, kompoziti s metalnom matricom, kaljeni čelici, lijevano željezo te materijali korišteni u medicini. [10]

Kod kriogene obrade legura na bazi titana, brzina skidanja materijala s obratka može se povećati do dva puta. Sile rezanja se povećavaju zbog otvrdnjavanja materijala pod djelovanjem hlađenja, no vijek trajanja alata se ipak povećava zbog intenzivnog odvođenja topline. Slika 10 uspoređuje intenzitet trošenja glodala kod kriogenog glodanja legure Ti6Al4V pomoću tekućeg CO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>. [10]



**Slika 10. Usporedba trošenja stražnje površine alata kod konvencionalnog i kriogenog glodanja [10]**

Kod konvencionalne obrade dolazi do najveće potrošnje alata u najkraćem roku. Iz grafa se može vidjeti da u jednom trenutku dolazi do katastrofalnog trošenja, a razlog tomu je generiranje visoke temperature. Kriogena obrada uz korištenje CO<sub>2</sub> medija daje bolje rezultate od konvencionalne obrade i manje trošenje alata. Iz grafa se može očitati se da najbolji i najjednoličniji raspored trošenja postiže obradom s uporabom tekućeg N<sub>2</sub>. Između prednje površine i odvojene čestice stvaraju se tekući i/ili plinoviti slojevi pomoću kojih se smanjuje trenje na dodiru [10]. Vijek trajanja alata je skoro dvostruko dulji nego kod konvencionalne obrade. Uz duži vijek alata i bolju mogućnost obrade teškoobradivih materijala, postoje koristi kriogene obrade u pogledu zaštite okoliša i radnika. Kao što je prije rečeno, najvažniji aspekt je da nema toksičnog djelovanja na čovjekovo zdravlje kao kod korištenja emulzije. S druge strane, ekonomska strana procesa je upitna zbog visoke cijene kriogenih medija. Takav medij mora biti skladišten na propisan način, najčešće u visokotlačnim spremnicima što dodatno povisuje troškove skladištenja i samog transporta [10].

## 5. KOMBINIRANI HIBRIDNI PROCESI OBRADJE

Kombinirani procesi odnose se na kombinaciju dvaju ili više postupaka obrade koji istovremenim djelovanjem obrađuju materijal, a niti jedan od njih nije primarni proces. Glavno obilježje im je da se kombinacijom procesa dobije potpuno novi način obrade, koji ima obilježja svih procesa koji ga čine, no ne može se dodijeliti kao varijacija nijednom od njih.

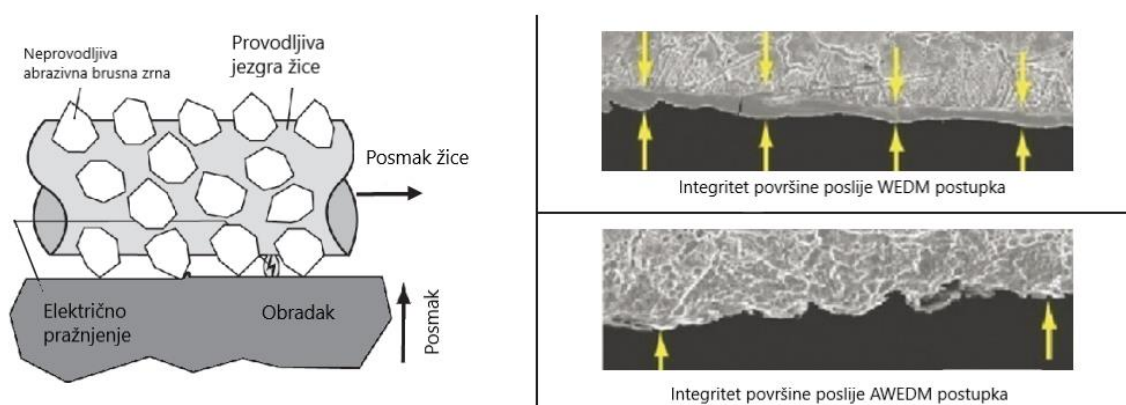
Kombiniranim se procesima postiže veća produktivnost, bolja preciznost i dimenzijska točnost obratka te se nude nove mogućnosti za obradu naprednih materijala. U nastavku rada biti će objašnjeni procesi obrade odvajanjem u kombinaciji s elektroerozijom (EDM) i elektrokemijskom obradom (ECM), kao i međusobna kombinacija EDM-a i ECM-a. Takvi kombinirani procesi danas su najkorišteniji i najrasprostranjeniji te su našli svoju primjenu u mnogim industrijskim granama.

### 5.1. Kombinacija obrade odvajanjem i elektroerozije (EDM)

Elektroerozija (EDM) je jedan od najkorištenijih nekonvencionalnih procesa obrade odvajanjem. Jedinstveno obilježje EDM-a je korištenje toplinske energije za obradu električno vodljivih materijala neovisno o njihovoj tvrdoći. Često se koristi u proizvodnji kalupa za izradu raznih komponenta u automobilskoj, zrakoplovnoj i medicinskoj industriji [11]. Kod EDM-a nema izravnog kontakta između elektrode i obratka te time uklanja neizbježne pojave koje se događaju kod konvencionalnih postupaka obrade poput vibracija, plastičnih deformacija nastalih djelovanjem alata, mehaničkih naprezanja i slično. Danas elektroda promjera 0,1 mm može služiti za bušenje provrta u zakrivljenim površinama pod strmim kutovima bez pojave „lutanja“ svrdla [11]. Jedan od postupaka EDM-a koji se izdvaja je EDM sa žičanom elektrodom (eng. „Wire EDM“, skraćeno WEDM).

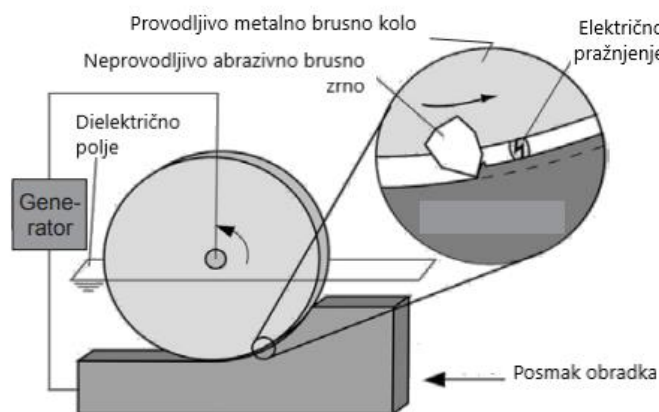
WEDM je termo-električni postupak u kojem materijal erodira pomoću iskri koje nastaju između žičane elektrode i obratka [11]. Kad se žica približi obratku dolazi do podjele u naboju, odnosno žica nosi jednu vrstu naboja, a obradak je nabijen suprotno te tako dolazi do iskrenja i taljenja čestica materijala. Kod elektroerozije, obrade laserom i ostalih termičkih procesa obrade često dolazi do taljenja okolnih slojeva materijala kod kojih se ponovnim stvrdnjavanjem stvara sloj pun zaostalih naprezanja (eng. „recast layer“). To je nepovoljna pojava koja predstavlja slabost u materijalu, slično poput zavara u zavarivanju. Da bi se stvaranje tog sloja svelo na minimum, razvija se postupak elektroerozije sa abrazivnom žicom.

EDM sa abrazivnom žicom (eng. „Abrasive Wire EDM“, skraćeno AWEDM) je potpuno novi kombinirani hibridni proces. Čini ga kombinacija brušenja i elektroerozije kod koje se žicom obrađuje materijal na način da ima dvostruko djelovanje. Slika 11 (lijevo) prikazuje žicu koja ima jezgru od vodljivog materijala koja vrši proces elektroerozije, a na jezgri ima nevodljive, abrazivne čestice slične brusnim zrnima, koje obrađuju materijal brušenjem. Kod AWEDM-a pojava sloja nastalog stvrdnjavanjem prethodno rastaljenog materijala („recast layer“) svedena je na minimum što je i prikazano slikom 11 (desno) u usporedbi s WEDM-om.



**Slika 11. Prikaz alata AWEDM postupka (lijevo) i usporedba integriteta površine između WEDM-a i AWEDM-a (desno) [9]**

Druga moguća izvedba obrade odvajanjem i elektroerozije je rotacijski EDM postupak. Čini ga kombinacija vodljivog metala i dijamantnog brusnog kotača prikazanog slikom 12. Po istom principu rada, vodljivi metal vrši postupak elektroerozije, a dijamantna zrna vrše obradu abrazijom. Takvim se postupkom dobiva bolji integritet obrađene površine u usporedbi s konvencionalnim brušenjem.



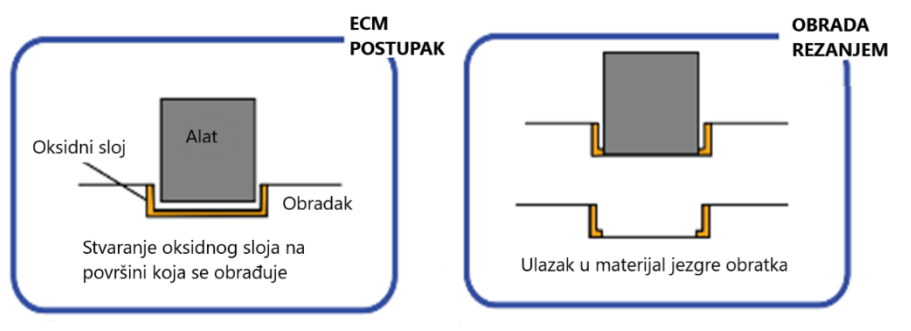
**Slika 12. Rotacijski EDM postupak [9]**



## 5.2. Kombinacija obrade odvajanjem i elektrokemijske obrade

Elektrokemijska obrada (ECM) je metoda uklanjanja materijala elektrokemijskim procesom pomoću kojeg se mogu obraditi napredni materijali poput legura visoke tvrdoće na bazi titana, nikla i kobalta. Skidanje materijala postiže se elektrokemijskim taljenjem materijala s anodno polariziranog obratka koji čini jedan dio elektrolitičke ćelije u ECM-u. Na takav način tvrde legure mogu biti obrađene te njihova tvrdoća neće utjecati na trošenje alata ni na brzinu rezanja [12]. Za rezanje se koristi elektroda, najčešće bakrena, koja se ne troši. Prolazom elektrode materijal se odvaja taljenjem te iza sebe ostavlja tanki sloj niže tvrdoće od početnog materijala. Sekundarni prolaz alatom koji vrši mehaničku obradu odvajanjem može se postići uz korištenje alata znatno niže tvrdoće od početnog materijala. ECM postupak koristi se kod poravnanja površine, oblikovanja složenih oblika te uklanjanja pukotina nastalih zbog zamora materijala u čeličnim nosivim konstrukcijama [12]. Prednost ECM-a je što ne stvara zaostala naprezanja i plastične deformacije u materijalu koji obrađuje jer nema kontakta između žice i obratka, slično kao i kod EDM postupka.

Danas postoji razvijen prototip alatnog stroja s kontrolom iona koji objedinjuje ECM postupak i mehaničku obradu odvajanjem materijala [13]. Stroj ima mogućnost mijenjanja otpora elektrolita pomoću kojeg se vrši elektrokemijska obrada. Razmak između elektrode i obratka ispunjen je takvim elektrolitom kroz koji se pušta električna struja te na takav način dolazi do taljenja materijala. Nakon prolaza elektrode kroz materijal, dovod električne struje se zaustavlja te tako omogućuje početak obrade mehaničkom obradom, u ovom slučaju početak glodanja. Glodanjem se uklanja oksidni sloj nastao djelovanjem ECM-a. Budući da je tvrdoća oksidnog sloja manja od tvrdoće materijala koji se obrađuje, proces se ponavlja dok se ne postigne unaprijed određena dubina obrade [13]. Shematski prikaz stvaranja i uklanjanja oksidnog sloja prikazan je na slici 13.

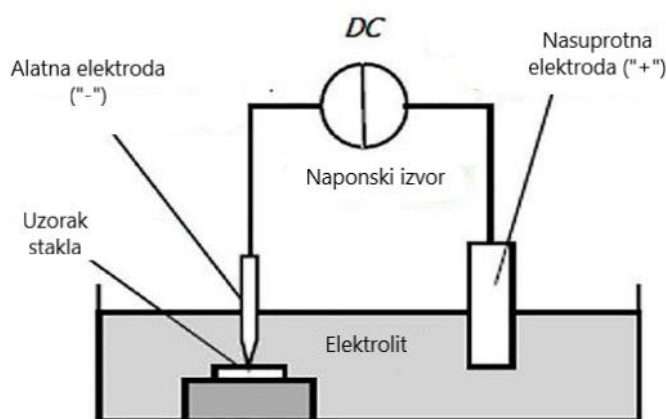


**Slika 13. Princip rada ECM postupka i mehaničke obrade odvajanjem [13]**

Cilj je takvog hibridnog stroja povećanje točnosti obrade i kvalitete površine te maksimalno smanjenje pojave srha što se ne može postići konvencionalnom obradom [13]. Efikasnost stroja je veća zbog eliminacije vremena potrebnog za promjenu metode obrade, odnosno nema dodatnog vremena potrebnog za transport i stezanje obratka na postolje drugog stroja.

### 5.3. Kombinacija elektroerozije i elektrokemijske obrade (EDM i ECM)

Obrada elektrokemijskim pražnjenjem (ECDM) je hibridni nekonvencionalni proces obrade koji ujedinjuje elektroeroziju (EDM) i elektrokemijsku obradu (ECM). ECDM su prvi predstavili Kurafuji i Suda tijekom mikro-obrade stakla. Uz staklo mogu se obrađivati i drugi nevodljivi materijali poput keramike, aluminijevog oksida, pleksiglasa, kvarca i slično. ECDM postupak obrade se sastoji od elektrokemijske ćelije prikazane na slici 14. [14]



Slika 14. Princip rada ECDM-a [14]

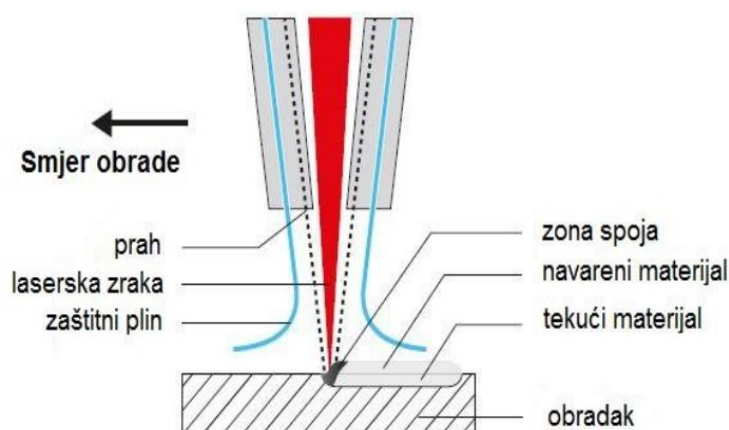
Uzorak stakla koji se obrađuje umoči se u elektrolit i zatim se dovodi napon između anodne i katodne elektrode. Anoda i katoda su razdvojene jedna od druge, a katodna elektroda, koji služi kao alat za obradu, je manja od anodne katode. Obje elektrode su spojene na istosmjernu struju što uzrokuje stvaranje mjehurića oko obje elektrode zbog elektrokemijskih reakcija. U slučaju da se primjenjuje obrada s граниčnim naponom, koji je najčešće 25 V, mjehurići postaju gušći i stapaju se u plinske filmove na obradnoj elektrodi. Tako formirani plinski filmovi dopuštaju iskrenje alata na način da ga izoliraju od okolnog elektrolita. Kad se takvoj elektrodi približi obradak, počine proces obrade. ECDM je kombinacija toplinskog taljenja i kemijskog taljenja, kod koje jedna iskra sadrži gustoću energije približnog iznosa  $2000 \text{ J/cm}^2$  u trajanju od  $100 \mu\text{s}$ . Takav intenzivan unos energije uzrokuje nagli porast temperature u lokalnom području dodira alata i obratka koji rezultira taljenjem materijala. Slični se rezultati obrade dobivaju kod obrade kvarca i keramike. [14]

## 6. KONTROLIRANA PRIMJENA PROCESNIH MECHANIZAMA

Druga skupina hibridnih procesa predstavlja kombinaciju dviju ili više operacija koje se uobičajeno izvode kao zasebne operacije u više koraka na više različitih strojeva. Takve hibridne procese karakterizira potpuno nova kombinacija sinergijskog učinka. Najčešće se primjenjuju aditivne tehnologije u kombinaciji sa obradom odvajanja čestica, poput laserskog oblaganja i naknadne obrade odvajanjem. Uz lasersko oblaganje i glodanje koje dominira ovom skupinom postupaka, u primjeni su još i otvrdnjavanje brušenjem te elektrolučno navarivanje i obrada odvajanjem.

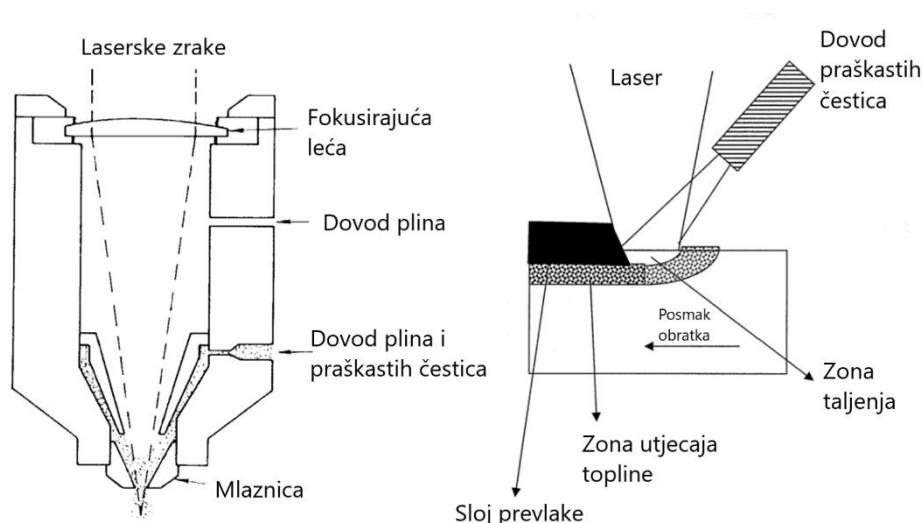
### 6.1. Lasersko oblaganje i glodanje

Lasersko je oblaganje aditivna tehnologija koju karakterizira nanošenje sitnih čestica sloj po sloj na površinu osnovnog materijala, od kuda dolazi i naziv „3D printanje“. Temelji se na doziranju praha, koji omogućuje aditivnu proizvodnju dijelova bez obradne komore i korištenja potpornih konstrukcija [15]. Uključuje sporo kretanje laserske glave u blizini površine obratka uz nanošenje čestica u područje rada laserske zrake što je prikazano slikom 15. Nanesene čestice moraju biti sposobne apsorbirati svjetlosnu energiju. Zahvaljujući apsorpciji energije iz laserskih zraka, dolazi do taljenja čestica i naknadnog skrućivanja što omogućuje međusobno vezanje materijala. Između nanesenog materijala i površine osnovnog materijala stvara se stabilna veza zbog djelomične difuzije materijala. Zona vezivanja čestica i površine materijala je vrlo tanka pa nema značajnijih promjena svojstava u osnovnom materijalu što čini takvu vrstu hibridnih procesa primamljivom kod popravaka ili obnove različitih dijelova.



Slika 15. Postupak laserskog oblaganja [15]

Kombinacija laserskog oblaganja i glodanja na jednom stroju jedna je od najvažnijih i najinovativnijih hibridnih procesa korištenih danas. Industrijsko „3D printanje“ pomoću lasera i naknadnog postupka glodanja omogućava izradu skupih i kompliciranih dijelova uz visoku preciznost, produktivnost i zadovoljavajuća svojstva površine. Čestice se često isporučuju u struji stlačenoga plina, slično kao i sredstvo za podmazivanje kod MQL postupaka koje se isporučuje u struji stlačenoga zraka. Takav plin služi kao zaštitna atmosfera kod zagrijavanja materijala te štiti od oksidacije i ostalih utjecaja okoline. Doziranje se može izvesti pomoću laserske glave koja ima integrirani sustav dovoda materijala (koaksijalni dovod materijala) za oblaganje ili pomoću zasebnog sustava za doziranje (bočni dovod materijala) prikazanih slikom 16 [16].



**Slika 16. Sustav za koaksijalni dovod materijala (lijevo) i bočni dovod materijala (desno) [16]**

Materijali koji se koriste za oblaganje često su legure na bazi nikla i kobalta, a rjeđe čisti metali. Karakterizira ih električna i poboljšana toplinska provodnost. S obzirom na mehanička svojstva, nanosene čestice mogu biti mekane, a s druge strane mogu biti tvrde i doprinijeti povećanju tvrdoće i čvrstoće. Uz metalne materijale koriste se i keramički materijali, titanijev nitrid za primjenu u medicini i tvrde čestice karbida koje se nanose u kombinaciji s ostalima jer se one ne tale već se integriraju radi poboljšanja mehaničkih svojstava.

Najčešća primjena laserskog oblaganja i glodanja danas se prepoznaje kod robusnijeg oblaganja turbinskih lopatica za hidroelektrane radi povećanja radnog vijeka alata i mogućnosti postizanja viših radnih temperatura i brzina. Također se primjenjuje za obradu kočionih diskova u

automobilskoj industriji, raznih vrsta alata za bušenje i glodanje te u medicinskoj industriji radi postizanja poboljšane kompatibilnosti implantata s ljudskim tijelom.

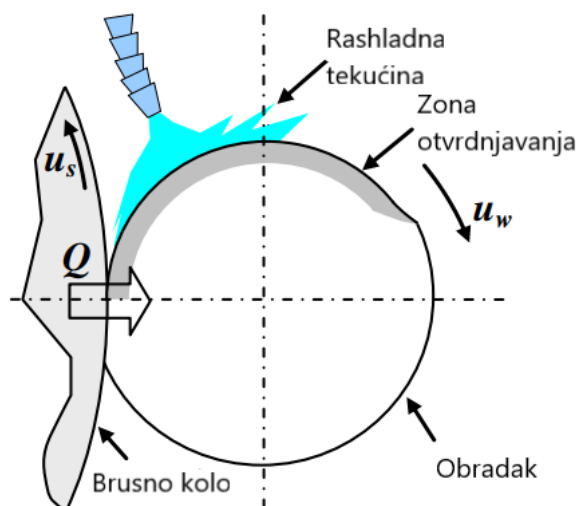
## **6.2. Elektrolučno navarivanje i glodanje**

Elektrolučno navarivanje i glodanje je hibridni proces koji je sličan laserskom oblaganju i glodanju, ali se djelovanje lasera zamjenjuje elektrolučnim navarivanjem. Elektrolučno navarivanje koristi se za taljenje nanesenog praškastog materijala, a glodanjem se taj materijal obrađuje s ciljem postizanja površinskih zahtjeva, kako estetskih tako i dimenzijskih. Takva kombinacija procesa nudi velike prednosti u odnosu na konvencionalnu obradu. U slučaju da se mora ukloniti veliki volumen materijala od početnog sirovca, izrada dijela korištenjem kombinacije aditivne tehnologije koju vrši elektrolučno navarivanje i naknadne završne obrade, odnosno glodanja može ponuditi brže vrijeme obrade uz manji volumen odvojenih čestica [17]. Uz navedeno, ako je materijal teškoobradiv, ekonomičnije je koristiti takav hibridni proces obrade zbog manjeg trošenja alata i manjih sila rezanja. Također, omogućuje izradu kompliciranih značajki i površina koje je teško ili gotovo nemoguće postići konvencionalnom obradom, a uključuju duboke i uske uvrte i provrte te kanale za jednolično temperiranje kalupa (eng. „conformal cooling“) [17].

## **6.3. Otvrdnjavanje brušenjem**

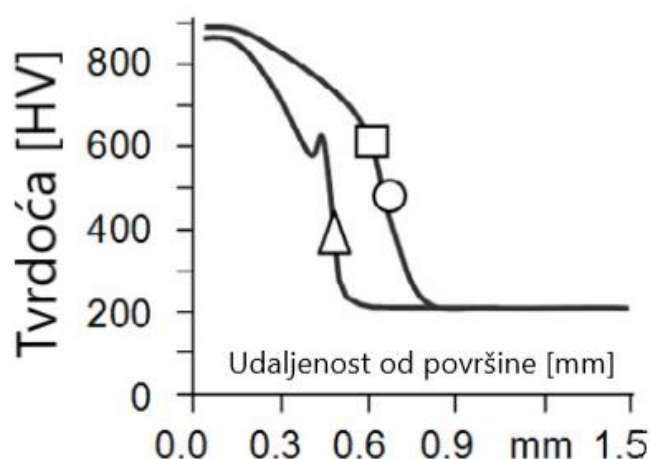
Kod hibridnog procesa otvrdnjavanja brušenjem istovremeno dolazi do brušenja i stvrdnjavanja obratka. Proces upotrebljava toplinu generiranu u području djelovanja brusnog alata za induciranje metalurških transformacija na površini obrađivanog materijala. Površina obratka se selektivno zagrijava iznad temperature austenitizacije te nakon toga dolazi do otvrdnjavanja materijala radi postizanja željene mikrostrukture. [18]

Glavni izazov kod procesa brusnog otvrdnjavanja je pravilan odabir parametara obrade kako bi se stvorili prikladni uvjeti za generiranje topline na površini obratka. Najviše utječu brzina i dubina rezanja. Parametri obrade nisu jednoznačni za sve procese i oni se moraju mijenjati ovisno o vrsti brusnog zrna, promjeru brusne ploče, primjeni rashladne tekućine te materijalu i obliku obratka. Da bi došlo do otvrdnjavanja materijala, obradak mora biti većih dimenzija kako bi se nastala toplina mogla pravilno odvoditi s površine materijala. U slučaju obrade tankih materijala, poput cilindričnih cijevi, potrebno je odvoditi toplinu pomoću rashladne tekućine što prikazuje slika 17. [18]



Slika 17. Obrada brusnim otvrdnjavanjem tankostjenih cilindričnih obradaka [18]

Kod procesa otvrdnjavanja brušenjem cilj je postizanje veće površinske tvrdoće, dok se jezgra nastoji održati „mekšom“ i duktilnom, slično svojstvima koja se traže kod cementiranja zupčanika. Na samoj površini materijala je najviša tvrdoća jer se površinski sloj izlaže najintenzivnijem hlađenju, a sve daljnjim prodiranjem u unutrašnjost materijala tvrdoća pada, što je prikazano slikom 18. Najčešća primjena takvih procesa je kod obrade čelika s udjelom ugljika od 0,5% do 1,5%.



Slika 18. Rezultati rasporeda tvrdoće po poprečnom presjeku za brusno otvrdnjavanje [9]

## 7. IZVEDBE HIBRIDNIH OBRADNIH STROJEVA

Kao što je već spomenuto, hibridni obradni strojevi predstavljaju kombinaciju dvaju ili više različitih procesa obrade na jednoj obradnoj platformi, odnosno na jednome stroju. Danas se pojavljuju različite izvedbe strojeva koji nude razne kombinacije procesa obrade s ciljem da se pronade najučinkovitiji i najekonomičniji način obrade teškoobradivih materijala. Od svih hibridnih obradnih strojeva korištenih danas, najrazvijeniji su strojevi koji nude kombinaciju laserskog oblaganja i naknadnu obradu odvajanjem čestica te strojevi koji nude obradu odvajanjem potpomognutu djelovanjem ultrazvuka. Razlozi koji su doveli do njihove veće razvijenosti su mogućnost primjene u raznim granama industrije te ekonomična i kvalitetna izrada, odnosno popravak kompleksnih dijelova izrađenih od teškoobradivih materijala.

### 7.1. LASERTEC 65 3D

Hibridni obradni stroj „LASERTEC 65 3D“ poznatog proizvođača DMG MORI, prikazan slikom 19, predstavlja kombinaciju aditivne proizvodnje koja se vrši procesom laserskog oblaganja integriranu u 5-osnu glodalicu. Stroj vrši lasersko oblaganje diodnim laserom snage 2,5 kW. Laserska glava je fleksibilno izvedena preko HSK sučelja te je sustav za izmjenu laserske glave potpuno automatiziran. Da bi se postigla 5-osna obrada, stroj ima okretno-nagibni stol koji služi za manipuliranje obratka. Glodanje se vrši s maksimalnom brzinom vrtnje glavnog vretena od  $18000 \text{ min}^{-1}$  [19].



Slika 19. Hibridni obradni stroj LASERTEC 65 3D [19]

Takvo inteligentno hibridno rješenje povezuje fleksibilnost aditivne proizvodnje s preciznošću uklanjanja materijala pomoću glodanja, omogućujući tako proizvodnju potpuno obrađenih komponenta u kvaliteti glodanja. Postupak obrade se sastoji od nanošenja metalnoga praha, detaljnije objašnjenog u prošlom poglavlju, koji omogućuje potpunu obradu bez obradne komore s brzinama proizvodnje i do deset puta većima nego kod generacije strojeva koje koriste „praškasti krevet“ [19]. Naneseni metalni prah se tali pomoću lasera sloj po sloj sve dok se ne postigne željeni oblik. Nakon toga slijedi operacija glodanja koja vrši završnu obradu što pokazuje veliku povezanost i upotpunjavanje aditivne proizvodnje i obrade odvajanjem čestica. Kombinacija navedenih postupaka omogućuje potpuno novu primjenu i nove mogućnosti obrade površina poput strmih i dugih kontura koje se mogu proizvesti bez ikakvih potpornih struktura. Omogućuje isplativu obradu masivnih komponenti uz proizvodnju minimalnog otpada i maksimalno očuvanje rezne oštrice. Mogućnost fleksibilnog prebacivanja između lasera i glodala omogućuje stroju izravnu obradu površina koje se na konvencionalnim strojevima ne mogu dosegnuti na već gotovom izratku [19].

U prošlosti je aditivna proizvodnja bila ograničena na proizvodnju prototipova i malih dijelova [19]. Kombinacija aditivne proizvodnje s doziranjem praha i glodanja koju nudi „LASERTEC 65 3D“ omogućila je obradu komponenti s kompleksnim površinama poput kućišta turbine, prikazanog slikom 20, čiji su koraci obrade prikazani u tablici 2. Primjenjuje se i u proizvodnji prototipova i malih serija kompleksnih komponenti izrađenih od lakih metala namijenjenih za automobilsku, zrakoplovnu i medicinsku industriju. Uz proizvodnju, stroj omogućuje popravak skupocjenih komponenti koje su istrošene i/ili oštećene prilikom rada, što uvelike doprinosi povećanju ekonomičnosti [19].

Kućište turbine  
Materijal: Nehrđajući čelik  
Trajanje laserskog oblaganja: 230 min  
Trajanje glodanja: 76 min  
Dimenzije: 180 mm x 150 mm



Slika 20. Kućište turbine



**Tablica 2. Koraci obrade kombinacijom laserskog oblaganja i glodanja kućišta turbine [19]**

<div style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; border: 1px solid black; background-color: white; margin-right: 5px;"></div> Lasersko oblaganje	<div style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #4a86e8; margin-right: 5px;"></div> Glodanje
 <p>1: osnovna izrada cilindričnog plašta</p>	 <p>2: rotirano za 90°: izrada rubova</p>
 <p>3: rotirano za 90°: glodanje ravnih površina i vanjske konture</p>	 <p>4: izrada provrta po rubu za prirubnicu</p>
 <p>5: nastavak izrade cilindričnog plašta</p>	 <p>6: izrada prijelaza na konusni dio</p>
 <p>7: laserska izrada koničnog ljevka</p>	 <p>8: izrada drugog ruba</p>
 <p>9: izrada 12 konektora</p>	 <p>10: glodanje konektora</p>
 <p>11: glodanje ruba i vanjske konture</p>	 <p>12: glodanje unutarnjih kružnih džepova</p>

## 7.2. INTEGREG I-400 AM

Tvrtka Mazak je, uz DMG MORI, jedna od vodećih proizvođača strojeva na današnjem tržištu te je također predstavila svoju verziju hibridnog obradnog stroja koji vrši obradu laserskim oblaganjem i glodanjem. Hibridni stroj „INTEGREG I-400 AM“ je 5-osni obradni centar s integriranom tehnologijom laserskog oblaganja metalnim prahom, prikazan na slici 21. Obilježja koja ga čine superiornim su integrirane dvije laserske glave za proces laserskog oblaganja, mogućnost zakreta glavnog vretena oko B osi od  $-30^{\circ}$  do  $+120^{\circ}$ , standardni automatski izmjenjivač alata te potpuno programabilan red čekanja materijala koji se trebaju obraditi [15].

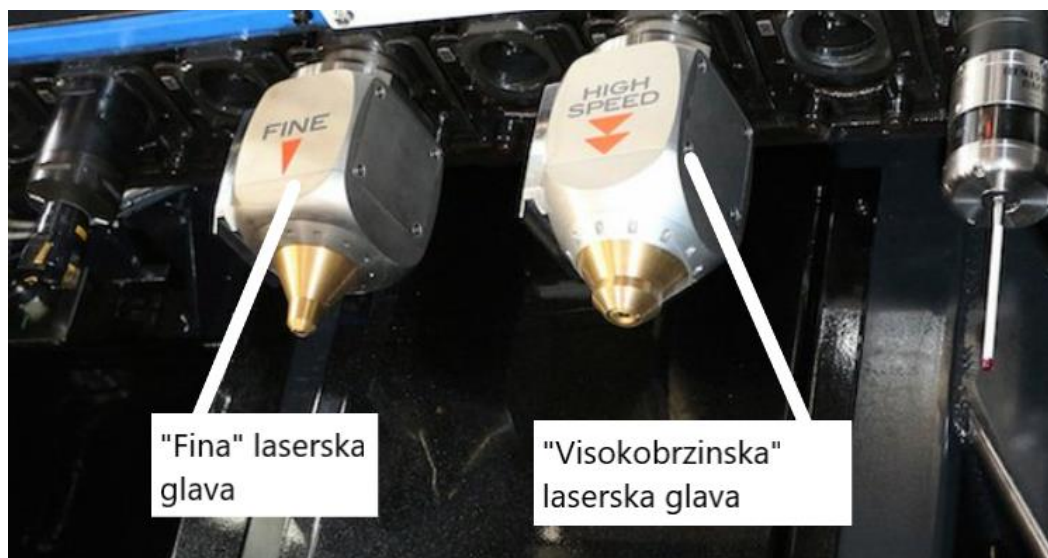


Slika 21. Hibridni obradni stroj INTEGREG I-400 AM [20]

Savršen je za proizvodnju malih serija proizvoda izrađenih od teškoobradivih materijala. Jednostavno obrađuje dijelove do gotovo završnog stupnja obrade, a zatim ih dovršava preciznim operacijama završne obrade [20]. Po potrebi stroj može laserski označiti dijelove i tako omogućiti lakše sortiranje gotovih dijelova nakon obrade.

Stroj čine posebnim dvije laserske glave koje su postavljene u standardno spremište alata. U spremištu se nalaze „fina“ laserska glava koja vrši doziranje metalnoga praha s visokom preciznošću i točnošću te služi za izradu kompleksnih dijelova čiji je prikaz dan slikom 22 [15]. Uz „finu“ lasersku glavu, u spremištu se nalazi i „visokobrzinska“ laserska glava koja služi za

bržu i grublju obradu. Karakteriziraju je veće brzine oblaganja i veći učinak doziranja zbog veće veličine čestica koje koristi za oblaganje [15]. Kao što je već spomenuto, stroj radi na principu taljenja metalnog praha pomoću apsorpcije topline iz lasera. Laserske glave nanose materijal sloj po sloj sve dok se ne postigne zahtijevani oblik.



Slika 22. „Fina“ i „visokobrzinska“ laserska glava [15]

Ono što stroj čini posebno zanimljivim jest primjena u zrakoplovnoj industriji. „INTEGREX I-400 AM“ nudi mogućnost popravka postojećih oštećenih lopatica zrakoplova [20], koje se do pojave hibridnih procesa nisu mogle popraviti bez visokih troškova. Uz zrakoplovnu, koristi se za izradu, popravak i prevlačenje komponenti korištenih u svemirskoj industriji, automobilske industriji, industriji nafte i plina, u energetske sektoru te pri konstrukciji kalupa [15].

### 7.3. Ultrasonic 10

Hibridni obradni stroj „Ultrasonic 10“ proizvođača DMG MORI najkompaktniji je 5-osni obradni centar s ultrazvučnom tehnologijom prikazan slikom 23 [15]. Zauzima površinu od 2 m<sup>2</sup> što ga čini izuzetno primamljivim za korištenje u manjim proizvodnim dvoranama. Uz male dimenzije stroj također obilježuju karakteristike obrade koje su zajedničke svim strojevima proizvođača DMG MORI te ga tako dovele do svjetskog uspjeha. Inačice poput HSK držača alata, izmjenjivačem alata sa spremištem za 16 alata, 4-paletnim sustavom za automatsku izmjenu obradaka, opremom za lasersko mjerenje i kontrolu te integrirane zakretne ručice

rotacijskog stola za istodobnu obradu u 5-osi pronašle su svoju primjenu u današnjoj industriji [21].



**Slika 23. Hibridni obradni stroj Ultrasonic 10 [21]**

Zahvaljujući visokofrekvencijskom glavnom vretenu HSK 25 koje je hlađeno vodom i sposobno postići maksimalnu frekvenciju vrtnje od  $42000 \text{ min}^{-1}$ , stroj „Ultrasonic 10“ može obrađivati široki raspon materijala uključujući teškoobradive materijale poput keramike, tvrdog metala, legura na bazi nikla i kobalta te stakla i korunda. Uključujući sve mogućnosti stroja uz činjenicu da zauzima samo  $2 \text{ m}^2$  radnog prostora, pronašao je svoju primjenu i u dentalnoj industriji, izradi satova i nakita te u preciznom strojarstvu [21].

#### **7.4. Ultrasonic 20 linear**

„Ultrasonic 20 linear“, prikazan slikom 24, jedna je od popularnijih izvedba hibridnog obradnog centra proizvođača DMG MORI koja nudi obradu 5-osnim visokobrzinskim glodanjem potpomognutu ultrazvučnom tehnologijom [22]. „Ultrasonic 20 linear“ karakterizira visokobrzinsko glavno vreteno s maksimalnom frekvencijom vrtnje do  $40000 \text{ min}^{-1}$ , inteligentni „Celos“ kontrolni sustav, brza izmjena alata između glavnog vretena i spremišta alata sposobnog za pohranu 30 prednamještenih alata te automatska izmjena obradaka s linearnim spremištem do 99 komada. Najbitnija karakteristika stroja uključuje integraciju

unaprijeđenog, potpuno digitalnog, kontroliranog ultrazvučnog generatora i ultrazvučnih aktuatora sposobnih za isporuku brzine vrtnje do  $50000 \text{ min}^{-1}$  [22].



**Slika 24. Hibridni obradni stroj Ultrasonic 20 linear [22]**

Sustav ultrazvučne tehnologije proizvođača DMG MORI odlikuje se većim volumenom skidanja materijala, preciznom obradom rubova bez stvaranja srha te smanjenjem sila rezanja do 40% tijekom strojne obrade zbog čega je takva tehnologija izuzetno pogodna za ekonomičnu obradu teškoobradivih materijala poput stakla, keramike, safira, tvrdog metala, kompozitnih materijala te za obradu karbida [22]. Tijekom obrade dolazi do oscilirajućih prekida kontakta između alata i obratka što omogućuje bolje podmazivanje i hlađenje rezne oštrice te učinkovito uklanjanje odvojene čestice s površine materijala. Cilj je ultrazvukom potpomognute obrade postizanje izvrsne kvalitete obrađene površine s hrapavošću manjom od  $0,1 \mu\text{m}$  bez pojave krhkih lomova [22]. Uz glodanje, „Ultrasonic 20 linear“ nudi visokoučinkovito brušenje potpomognuto ultrazvučnim vibracijama za još bolju kvalitetu površine dijelova koji to zahtijevaju, prikazano slikom 25.



**Slika 25. Unutarnje i vanjsko brušenje potpomognuto ultrazvukom rotaciono simetričnih dijelova [22]**

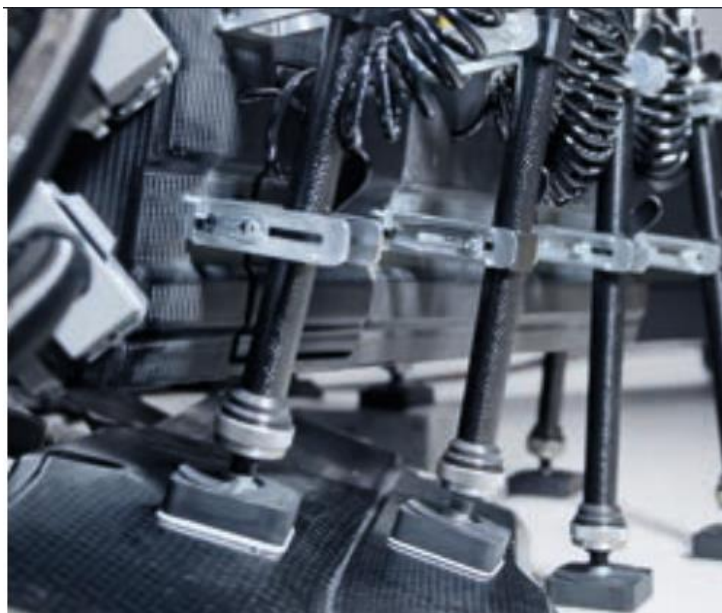
### 7.5. Ultrasonic mobileBlock

Jedna od zanimljivijih izvedba strojeva je hibridni obradni stroj „Ultrasonic mobileBlock“ proizvođača DMG MORI prikazan na slici 26. To je prijenosni 5-osni ultrazvučni obradni stroj koji svojim principom rada nudi široke mogućnosti obrade. Glavno vreteno stroja ima frekvenciju vrtnje maksimalno do  $35000 \text{ min}^{-1}$  koje se nalazi u nagibnoj glavi s mogućnošću nagiba od  $-95^\circ$  do  $+95^\circ$  u smjeru A osi [15]. Stroj je konstruiran od laganih materijala, 80% polimer ojačan ugljičnim vlaknima, 15% aluminij i 5% alatni čelik, zbog čega teži svega 150kg.



**Slika 26. Hibridni obradni stroj Ultrasonic mobileBlock [23]**

Pridržavanje i zauzimanje položaja rada mu omogućuje sustav posebno oblikovanih, zamjenjivih vakuumskih nožica s kuglastim zglobovima koji ima sposobnost prilagodbe zakrivljenim površinama na koje se pričvršćuje [15, 23]. Svaka nožica ima zaseban ventil i kontrolira se samostalno. Maksimalni raspon prilagodbe je 400 mm uz sposobnost dvostrukog kompenziranja kuta [23]. Vakuumske nožice su prikazane na slici 27.



**Slika 27. Vakuumski sustav prilagodljivih nožica [23]**

„Ultrasonic mobileBlock“ karakterizira integrirani sustav laserskog skeniranja. Sastoji se od dva različita tipa lasera, točkastog i linijskog. Točkasti laser služi za detekciju površine radnog komada u Z osi s dosegom mjerenja do maksimalno 200 mm. Linijski laser koristi 640 pojedinih točaka skeniranja te služi za povratnu informaciju skeniranog 3D oblika površine koju šalje u upravljačko računalo. [23]

Upravljačko računalo, prikazano slikom 28, je odvojeno od same radne jedinice, a karakterizira ga jednostavna kontrola i definiranje parametara obrade putem zaslona na dodir. Računalo ima pristup internetu što pridonosi dodatnoj fleksibilnosti i jednostavnosti korištenja. Zahvaljujući potpunoj kontroli nad parametrima obrade od samog crteža, detekcije oštećenih površina pomoću lasera te generiranja konačnih NC kodova za obradu nudi jednostavno i intuitivno korištenje. [23]



**Slika 28. Upravljačko računalo stroja Ultrasonic mobileBlock [23]**

„Ultrasonic mobileBlock“ se najčešće primjenjuje u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, brodogradnji i u energetsom sektoru [15]. U zrakoplovnoj i brodskoj industriji najčešće služi za popravak oštećenih površina koje je lakše obraditi na samom zrakoplovu ili brodu nego da se vrši demontaža. Ako se obrađuju strme, gotovo okomite površine, stroj se pridržava pomoću kрана radi dodatne sigurnosti, prikazano slikom 29 (lijevo). Pomoćni kran može služiti i za lakše i brže pozicioniranje stroja što prikazuje slika 29 (desno) na primjeru u automobilskoj industriji.



**Slika 29. Prikaz pozicioniranja stroja uz pomoć kрана u zrakoplovnoj (lijevo) i automobilskoj industriji (desno) [23]**



## 8. ZAKLJUČAK

Zahtjevi svakodnevnog tržišta se mijenjaju iz dana u dan i sve se više teži bržoj, boljoj i kvalitetnijoj proizvodnji. Da bi se neka proizvodnja mogla prilagoditi zahtjevima tržišta mora pronaći rješenje u hibridnim procesima obrade. Konvencionalni alatni strojevi postoje približno 100 godina i kroz desetljeća su postupno doživjeli svoj puni razvoj i maksimalnu iskoristivost. Naravno, oni se koriste i danas, no brzina njihovoga razvoja u usporedbi s razvojem i mogućnostima hibridnih obradnih strojeva je zanemarivo mala.

Hibridni obradni strojevi nude kombinaciju dvaju ili više različitih procesa obrade na jednoj obradnoj platformi što ih čini izuzetno prilagodljivima za budući razvoj. Ovisno o tome što nekom proizvodnom sustavu treba, hibridni se strojevi nude kao izvedbe različitih procesa koji na prvi pogled djeluju nespojivo, a s druge strane ostvaraju iznimne rezultate obrade. Glavni i neizostavni uzrok zašto su hibridni strojevi budućnost obrade jest razvoj materijala.

Napredni, odnosno teškoobrađivi materijali su novi materijali koji, zbog svojih izrazito dobrih eksploatacijskih svojstava, čine velike probleme u obradi, a posebice u obradi odvajanjem čestica. Takvi materijali imaju poboljšana svojstva poput povišene površinske tvrdoće, visoke čvrstoće te poboljšana toplinska i električna svojstva što ih čini superiornima za korištenje u industrijama poput zrakoplovne, automobilske i svemirske gdje materijali moraju biti najkvalitetniji. Obrada takvih materijala uzrokuje smanjenje radnoga vijeka reznog alata zbog čega konvencionalna obrada ne može biti ni ekonomična ni brza.

Hibridni procesi obrade nude kombinacije različitih procesa kojima je jedan od ciljeva maksimalno produljenje radnog vijeka alata što posljedično utječe na cijenu proizvoda. Uz cijenu, kvaliteta površine dijela izrađenog na hibridnom stroju je nenadmašiva, što se najbolje vidi u obradi potpomognutoj vibracijama. Uz navedeno, još jedna bitna prednost je fleksibilnost. Lasersko oblaganje je najbolji primjer jer dokazuje da se mogu proizvoditi kompleksne površine od naprednih materijala, nakon čega se vrši završna obrada odvajanjem čestica uz minimalni otpad i često mijenjanje asortimana. Od svih kombinacija procesa, danas su najrazvijeniji hibridni strojevi za lasersko oblaganje i glodanje te hibridni strojevi za obradu odvajanjem uz pomoć ultrazvuka, koji otvaraju jedno sasvim novo poglavlje buduće proizvodnje.

**LITERATURA**

- [1] Cebalo, R., Ciglar, D., Stoić, A., *Fleksibilni obradni sustavi*, Zagreb, 2005.
- [2] [A Review of Hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives \(bath.ac.uk\)](#) (Pristupljeno 18.12.2023.)
- [3] [Laser Assisted Machining of Difficult to Cut Materials: Research Opportunities and Future Directions - A Comprehensive Review \(sciencedirectassets.com\)](#) (Pristupljeno 19.12.2023.)
- [4] Udiljak, T., Ciglar, D., Klaić, M., Staroveški, T., *Predavanje Postupci obrade odvajanjem*, FSB, 2023.
- [5] [https://www.researchgate.net/profile/A-Loureiro/publication/283863116\\_Properties\\_and\\_applications\\_of\\_titanium\\_alloys\\_A\\_brief\\_review/links/578e0d7a08ae35e97c3f5e6e/Properties-and-applications-of-titanium-alloys-A-brief-review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/A-Loureiro/publication/283863116_Properties_and_applications_of_titanium_alloys_A_brief_review/links/578e0d7a08ae35e97c3f5e6e/Properties-and-applications-of-titanium-alloys-A-brief-review.pdf) (Pristupljeno 19.12.2023.)
- [6] <http://www.ftn.uns.ac.rs/ojs/index.php/zbornik/article/download/680/735> (Pristupljeno 20.12.2023.)
- [7] <https://hrcak.srce.hr/file/307973> (Pristupljeno 23.12.2023.)
- [8] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119307760> (Pristupljeno 23.12.2023.)
- [9] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581102916X> (Pristupljeno 27.12.2023.)
- [10] [http://eng.mechanik.media.pl/pliki/do\\_pobrania/artykuly/22/2018\\_12\\_s1050\\_eng.pdf](http://eng.mechanik.media.pl/pliki/do_pobrania/artykuly/22/2018_12_s1050_eng.pdf) (Pristupljeno 28.12.2023.)
- [11] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506002148> (Pristupljeno 29.12.2023.)
- [12] <https://www.academia.edu/download/63686814/IJME-V7I6P10220200620-432-nbuwie.pdf> (Pristupljeno 30.12.2023.)
- [13] [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695508001521?casa\\_token=5t6zJ4oJ8SwAAAAA:akMq9lGx9UzNtRxHdwuiewVpSKuQPLZU9\\_SGMqG6YNY\\_TafYRjMvnujBoajBgxn6WuX1l8y3nVI](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695508001521?casa_token=5t6zJ4oJ8SwAAAAA:akMq9lGx9UzNtRxHdwuiewVpSKuQPLZU9_SGMqG6YNY_TafYRjMvnujBoajBgxn6WuX1l8y3nVI) (Pristupljeno 30.12.2023.)
- [14] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017316305904> (Pristupljeno 30.12.2023.)
- [15] Ciglar, D., *Predavanje Fleksibilni obradni sustavi*, FSB, 2023.

- 
- [16] <https://link.springer.com/article/10.1361/105996399770350502> (Pristupljeno 02.02.2024.)
- [17] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695504003074> (Pristupljeno 02.02.2024.)
- [18] <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-006-0467-9> (Pristupljeno 02.02.2024.)
- [19] [pl0uk13-lasertec-series-pdf-data.pdf \(interempresas.net\)](#) (Pristupljeno 04.02.2024.)
- [20] [INTEGREX i-400AM \(mazakusa.com\)](#) (Pristupljeno 04.02.2024.)
- [21] <https://www.interempresas.net/Plastics/Companies-Products/Product-Machining-center-DMG-Ultrasonic-10-49145.html> (Pristupljeno 05.02.2024.)
- [22] <https://en.dmgmori.com/news-and-media/news/grindtec-ultrasonic-20-linear> (Pristupljeno 05.02.2024.)
- [23] [13063730-5FD5-4ED1-B244-A101DF9CA5DE.pdf \(to2025.com\)](#) (Pristupljeno 05.02.2024.)