

Hibridni obradni sustavi

Makoter, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:530652>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matija Makoter

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Miho Klaić, dipl. ing.

Student:

Matija Makoter

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru na razumijevanju i vodstvu.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci koji su uvijek bili tu za mene.

Želim se dodatno zahvaliti svojim kolegama i prijateljima koji su mi pomogli.

Ne bih uspio bez svih vas.

Matija Makoter



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matija Makoter**

JMBAG: **0035219584**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Hibridni obradni sustavi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Hybrid machining systems**

Opis zadatka:

Suvremeni trendovi u obradi odvajanjem čestica, s posebnim naglaskom na obradu teško obradivih materijala, sve su više orijentirani upotrebi hibridnih alatnih strojeva.

U radu je potrebno dati pregled značajnijih postupaka hibridnih obrada teško obradivih materijala kao i obradi odradaka složenih oblika i dimenzija. Navesti prednosti i nedostatke te područja primjene navedenih obrada. Dati zaključke rada.

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

Zadatak zadan:

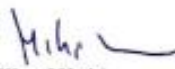
30. 11. 2022.

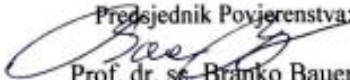
Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Zadatak zadao: 
Doc. dr. sc. Miho Klaić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS KRATICA.....	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. PREGLED MOGUĆIH HIBRIDNIH PROCESA.....	2
2.1. Potpomognuti hibridni procesi.....	2
2.1.1. Obrada odvajanjem potpomognuta ultrazvučnim vibracijama	2
2.1.2. Obrada odvajanjem potpomognuta vanjskim izvorom topline	3
2.1.3. Obrada vodenim mlazom potpomognuta laserom	5
2.1.4. ECM potpomognut laserom.....	5
2.1.5. Obrada odvajanjem potpomognuta kriogenim hlađenjem	5
2.1.5.1. Kriogena obrada odvajanjem tvrdih materijala.....	5
2.1.5.2. Kriogena obrada odvajanjem mekih materijala	5
2.1.6. Obrada odvajanjem potpomognuta visokotlačnim hlađenjem.....	6
2.1.7. Kriogena obrada odvajanjem potpomognuta laserom ili plazmom	8
2.2. Kombinirani hibridni procesi	8
2.2.1. ECM (Electro Chemical Machining) i obrada odvajanjem	8
2.2.2. EDM (Electric Discharge Machining) i obrada odvajanjem	9
2.2.3. Rezanje laserom i obrada odvajanjem	9
2.2.4. Rezanje laserom i EDM ili ECM	9
2.2.5. EDM i ECM.....	10
2.2.6. Brušenje i otvrdnjavanje	10
2.3. Aditivni hibridni procesi	10
2.3.1. Taljenje nanesenog materijala	11
2.3.2. Hibridni aditivni proizvodni procesi s obradom odvajanjem	11
2.3.2.1. Aditivna proizvodnja taljenjem metala i obrada odvajanjem	11
2.3.2.2. Selektivno lasersko taljenje i obrada odvajanjem	12
2.4. Hibridni procesi oblikovanja deformiranjem.....	13
2.4.1. Oblikovanje limova deformiranjem potpomognuto vanjskim izvorom topline	14
2.4.2. Rezanje potpomognuto laserom.....	14
2.4.3. Duboko vučenje i obrada odvajanjem	14
2.4.4. Glodanje i oblikovanje deformiranjem	15

3. HIBRIDNI OBRADNI SUSTAVI U INDUSTRIJI.....	16
3.1. Najviše korišteni hibridni sustavi danas	16
4. ADITIVNI HIBRIDNI OBRADNI STROJEVI.....	17
4.1. LASERTEC 65 DED hibrid.....	17
4.2. INTEGREGX i-400 AM.....	18
4.3. LUMEX Avance-60.....	19
4.4. 3D Hybrid Solutions glave za aditivnu proizvodnju.....	20
4.4.1. Elektrolučne glave	21
4.4.2. Laserske glave.....	21
4.4.3. Glave za hladno naštrcavanje.....	22
4.5. LENS 860 HYBRID	23
4.6. OPM250L	24
5. PREDNOSTI I NEDOSTACI ADITIVNIH HIBRIDNIH OBRADNIH SUSTAVA	26
5.1. Aditivna tehnologija.....	26
5.2. Obrada odvajanjem čestica	28
5.3. Aditivna hibridna obrada	28
6. ZAKLJUČAK.....	31
Literatura.....	32

POPIS SLIKA

Slika 1.	Usporedba provrta kod ultrazvučno potpomognutog i konvencionalnog bušenja...	3
Slika 2.	Usporedba rezne oštrice svrdla kod ultrazvučno potpomognutog i konvencionalnog bušenja	3
Slika 3.	Omjer trošenja alata i dužine reza ovisno o temperaturi.....	4
Slika 4.	Omjer sila rezanja i temperature	4
Slika 5.	Graf ovisnosti čvrstoće o temperaturi	6
Slika 6.	Razlike u izgledu odvojene čestice kod tokarenja Inconela 718	7
Slika 7.	Omjer trošenja alata i vremena obrade	7
Slika 8.	Skica hibridnog procesa obrade odvajanja i ECM-a.....	8
Slika 9.	Skica EDM-a.....	9
Slika 10.	Skica ECDM-a	10
Slika 11.	Skica procesa laserskog navarivanja i glodanja.....	11
Slika 12.	Lijevo SLM, desno glodanje.....	12
Slika 13.	Proizvod u metalnom prahu nakon SLM-a.....	13
Slika 14.	Formiranje u kalupu u više točaka istovremeno sa segmentiranom matricom	14
Slika 15.	LASERTEC lijevo lasersko navarivanje, desno glodanje	18
Slika 16.	INTEGREX i-400 AM.....	19
Slika 17.	Blok V8 motora.....	20
Slika 18.	Vrste 3D Hybrid glava.....	21
Slika 19.	Prikaz postupka laserskog zavarivanja	22
Slika 20.	Oblici laserske zrake	22
Slika 21.	Tehnologija hladnog	23
Slika 22.	Sudar čestica s površinom obratka.....	23
Slika 23.	LENS 860 HYBRID	24
Slika 24.	OPM250L.....	25
Slika 25.	Izgled proizvoda prije i poslije završne obrade	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i mane SLM-a	26
Tablica 2. Prednost i mane elektrolučnog i laserskog navarivanja	26
Tablica 3. Prednosti i mane hladnog naštrcavanja	27
Tablica 4. SWOT analiza aditivne tehnologije	27
Tablica 5. SWOT analiza obrade odvajanjem čestica	28
Tablica 6. SWOT analiza aditivne hibridne obrade	29

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
ECM	Electro Chemical Machining
EDM	Electric Discharge Machining
ECDM	Electro Chemical Discharge Machining
DED	Direct Energy Deposition
SLM	Selective Laser Melting
HPC	High Pressure Cooling

SAŽETAK

Hibridni obradni sustavi temelje se na dvije ili više tehnologija obrade materijala koje se obavljaju na jednom stroju. Nastali su s ciljem zadovoljavanja zahtjeva tržišta na brzinu i kvalitetu obrade i dolaska do konačnog proizvoda. Najviše korišteni hibridni obradni strojevi danas su oni koji kombiniraju aditivnu obradu s obradom odvajanjem čestica.

Cilj ovog rada je dati pregled svih modernih hibridnih obradnih sustava. Pokazat će se najzastupljeniji aditivni hibridni obradni sustavi na tržištu i njihovi proizvođači. Detaljnije će se razjasniti tehnologije inkorporirane u hibridne aditivne obrade sustave i prikazat će se njihove prednosti i mane.

Ključne riječi: hibridni obradni sustav, hibridni aditivni obradni strojevi, aditivna obrada, obrada odvajanjem čestica

SUMMARY

Hybrid manufacturing machines are based on two or more material manufacturing technologies that are carried out on one machine. They were first built with the goal of satisfying industry demands for fast and quality final product. Most used hybrid manufacturing systems are the ones combining additive manufacturing technologies and machining.

The goal of this paper is to give a review of all hybrid manufacturing systems today. Additive hybrid manufacturing machines on the market and their suppliers will be demonstrated. Technologies incorporated in hybrid additive manufacturing machines will be explained in detail, and their advantages and disadvantages will be shown.

Key words: hybrid manufacturing systems, hybrid additive manufacturing machines, additive manufacturing, machining

1. UVOD

U današnje vrijeme zahtjevi za razvoj i proizvodnju novih proizvoda sve su veći i sve ih je teže postići. Zahtjeva se povećanje kvalitete, kraće vrijeme rada i niži troškovi obrade. Uz to traži se i kraće vrijeme razvoja proizvoda. Kako se svijet okrenuo očuvanju okoliša veliki faktor je i što manje zagađenje i što manji utrošak energije uz jednaku ili veću proizvodnost. Svakim danom se pojavljuju novi materijali koji zahtijevaju nove uvjete obrade koji se isto trebaju uzeti u obzir. Postizanje svih gore navedenih zahtjeva nemoguće je bez konstantnog napretka u pogledu novih, boljih, bržih i ekonomičnijih alatnih strojeva.

Od pojave prvih ručnih, pa preko strojnih i numerički upravljanih alatnih strojeva danas se razvijaju hibridni obradni sustavi. Hibridni obradni sustavi su, kao što samo ime sugerira, obradni sustavi s barem dva ili više različita tipa obrade koje imaju međusobnu interakciju i na istom su stroju. [1] Sama ideja postoji već dugi niz godina, a prvi takvi moderni sustavi nastali su još 1990-ih kao zajednički projekt znanstvenih institucija i industrije u Japanu, ali su se tek nedavno počeli značajnije upotrebljavati u industriji. [2]

U ovom radu dan je pregled hibridnih obradnih sustava te će se objasniti procesi koji se koriste kod njih kako bi se dobio bolji dojam o pozadini i kompleksnosti svakog sustava. Na osnovu dostupnih radova koji su se bavili analizom tržišta detaljnije su pokazane karakteristike danas najviše korištenih hibridnih obradnih sustava u industriji. Uz navedeno dane su njihove prednosti i mane.

2. PREGLED MOGUĆIH HIBRIDNIH PROCESA

Postoje razne tehnike obrade materijala, no nisu sve prigodne za hibridne sustave. Procesu trebaju biti kompatibilni i davati neku prednost konačnom proizvodu. U ovom dijelu će se pokazati svi hibridni procesi koji su definirani u današnje vrijeme. Od navedenih procesa neki se i dalje ne koriste u industriji, ali imaju veliku šansu za implementaciju u narednim godinama. Procesu u nastavku su podijeljeni u 4 grupe po sličnosti, a svaka grupa se bavi drugom kombinacijom obradnih procesa. [1]

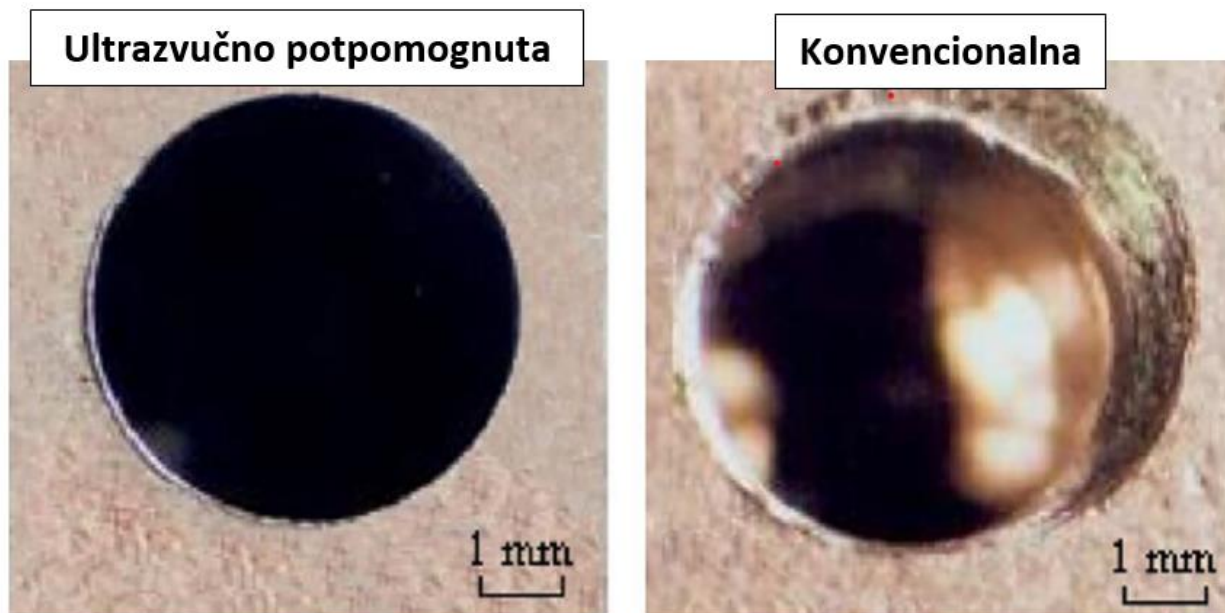
- 1. Potpomognuti hibridni procesi
- 2. Kombinirani hibridni procesi
- 3. Aditivni hibridni procesi
- 4. Hibridni procesi oblikovanja deformiranjem

2.1. Potpomognuti hibridni procesi

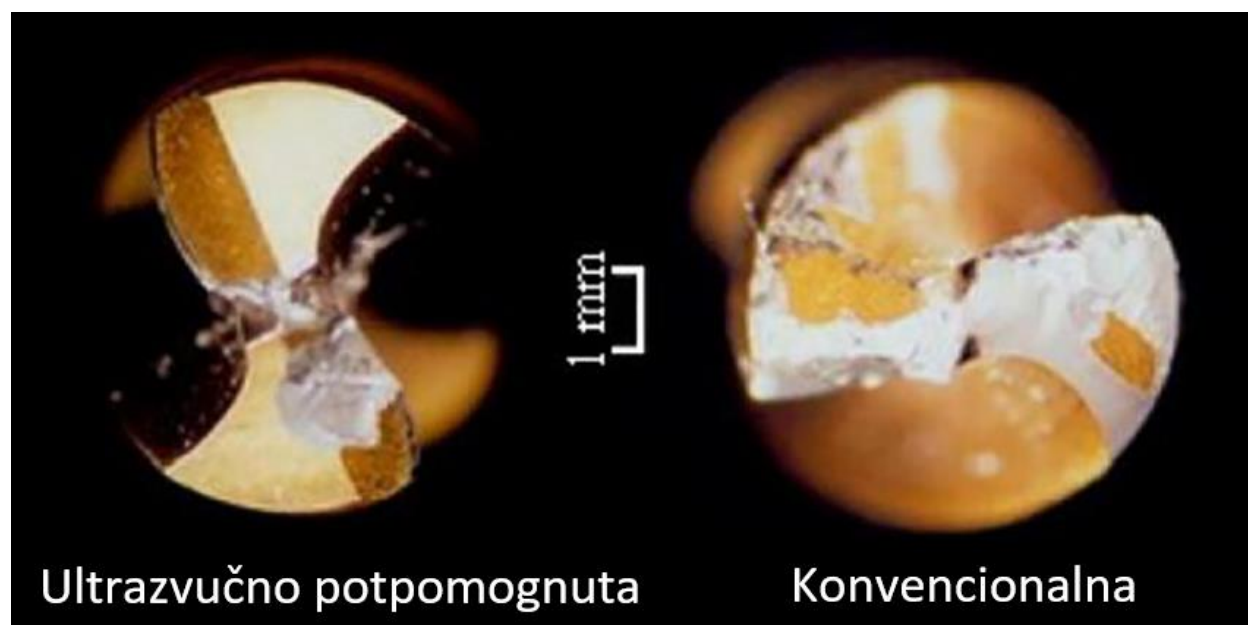
U ovoj skupini hibridni procesi imaju unutar sebe definiran glavni proces obrade i sporedni proces koji služi kao asistencija glavnom. Glavni procesi su oni koji oblikuju ili skidaju materijal, dok su sporedni procesi oni koji glavnom procesu pridonose na neki način.

2.1.1. Obrada odvajanjem potpomognuta ultrazvučnim vibracijama

Ultrazvučno potpomognuta obrada odvajanjem čestica temelji se na dodatnom oscilacijskom gibanju alata uz postojeće glavno gibanje pri procesu obrade. Do sada su napravljena brojna istraživanja koja kombiniraju postupke tokarenja, glodanja, bušenja, brušenja i EDM-a potpomognuta ultrazvučnim vibracijama. Iz dostupnih radova kao glavna prednost navedenog postupka spominje se poboljšanje kvalitete površine uz manje trošenje alata, kao i smanjenje sila rezanja. Dodatno gibanje ostvaruje se vibracijama pomoću piezoelektričnih aktuatora u ultrazvučnom području koje se kreću najčešće iznad 20 kHz i daleko su iznad slušnog spektra čovjeka. Dodatnim gibanjem ostvaruju se napredci u pogledu manjeg trošenja alata (reznih oštrica kod postupka tokarenja, glodanja, bušenja i brušenja ili elektrode kod EDM-a). Ultrazvučno oscilirati može ili obradak ili alat, a razlike u kvaliteti površine nema, već je razlika samo u drugačijoj izvedbi samog stroja. Kombinacijom ovih tehnologija mogu se obrađivati razni materijali, neki od njih su čelik, nehrđajući čelik, legure titana, bakrene legure, razni kompoziti i keramika. Specifično za bušenje, ultrazvučne vibracije pomažu kod teško izvedivih dubokih provrta malih promjera. Na slici 1. vidljiva je razlika u kvaliteti provrta izrađenog konvencionalnim postupkom bušenja odnosno provrta izrađenog postupkom bušenja potpomognutog ultrazvučnim vibracijama. Vidljiva je razlika u kvaliteti provrta i može se uočiti veća točnost ultrazvučno potpomognutog provrta. Prema proučenim radovima ultrazvučne vibracije uzrokuju manje stvaranje naljepaka na reznim oštricama (prikazano na slici 2.), te se danas uvelike koriste u svemirskoj i zrakoplovnoj industriji. [27]



Slika 1. Usporedba provrta kod ultrazvučno potpomognutog i konvencionalnog bušenja [27]

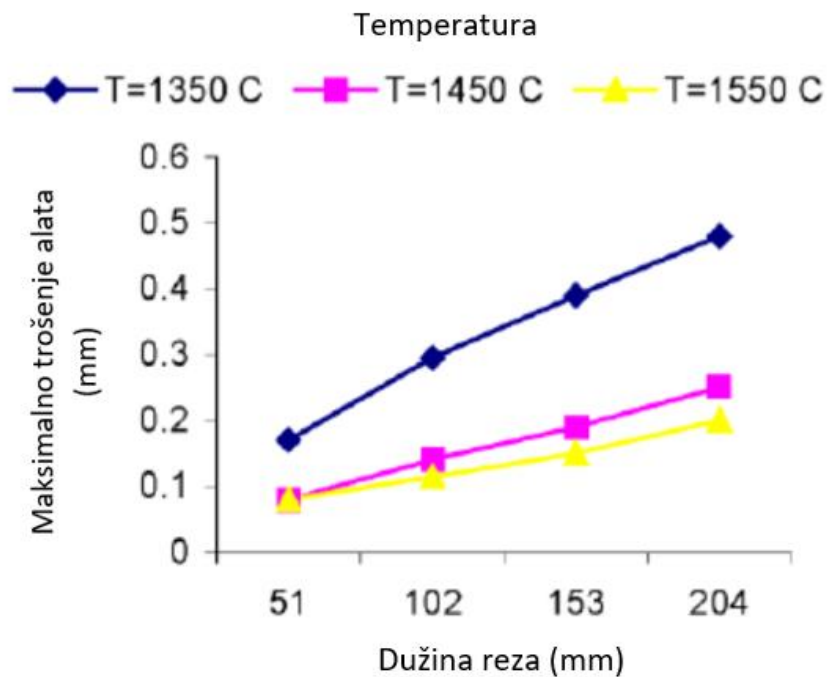


Slika 2. Usporedba rezne oštrice svrdla kod ultrazvučno potpomognutog i konvencionalnog bušenja [27]

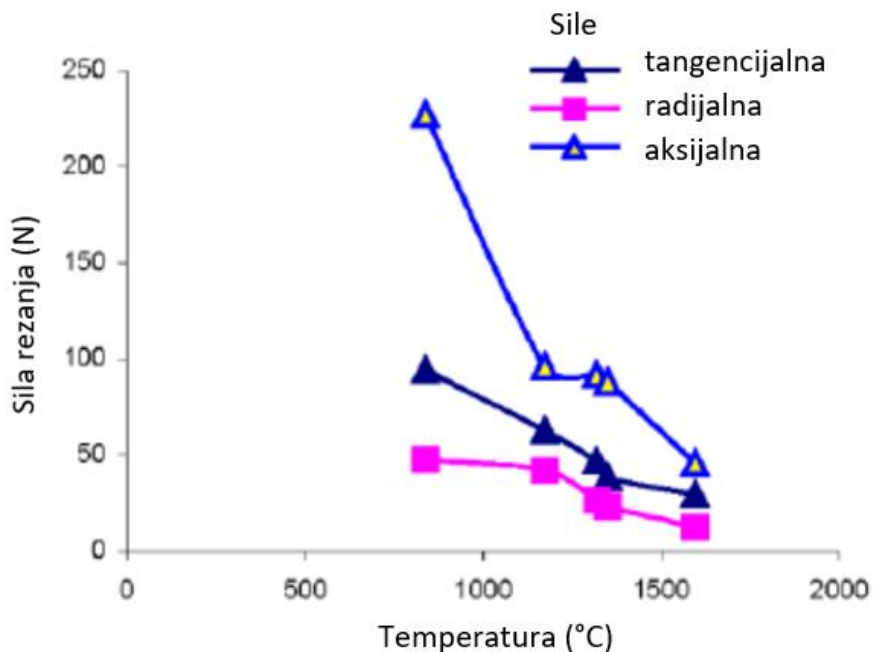
2.1.2. Obrada odvajanjem potpomognuta vanjskim izvorom topline

Ova kategorija koristi vanjski izvor topline za zagrijavanje obratka u blizini rezne oštrice. Ovakvom kombinacijom, toplina koja dolazi izvana lokalno omekšava materijal i mijenja mu mikrostrukturu, uslijed čega dolazi do smanjenja tvrdoće, sila rezanja i trošenja alata. Na grafovima sa slika 3. i 4. vidi se napredak u pogledu trošenja alata i smanjenju sila rezanja s povećanjem temperature. Dodatnim unosom topline u blizini zone rezanja poboljšava se

obrადivost. U radovima se spominju dva izvora topline, laser i plazma. Laserski izvori topline se koriste kod obrada keramike, kompozita s metalnim matricama i visokotemperaturnih legura. Pri tome veliku pozornost treba usmjeriti na korištenje SHIP-a kako ne bi došlo do zapaljenja. Uzimajući to u obzir najčešće se koristi kombinacija sa suhom obradom. [31]



Slika 3. Omjer trošenja alata i dužine reza ovisno o temperaturi [31]



Slika 4. Omjer sila rezanja i temperature [31]

2.1.3. Obrada vodenim mlazom potpomognuta laserom

Rezanje vodenim mlazom jedan je od često korištenih postupaka kod izrezivanja materijala ili kod pripreme obradaka. Kod ove hibridne obrade vodeni mlaz potpomognut je laserskom obradom u vidu zagrijavanja zone rezanja neposredno prije obrade. Pri tome dolazi do zagrijavanja zone rezanja te prolaskom vodenog mlaza dolazi do naglog hlađenja i temperaturnog šoka uslijed čega se pospješuje skidanje materijala. Takav oblik hibridne obrade primjenjiv je kod obrade keramičkih materijala. [1]

2.1.4. ECM potpomognut laserom

U ovom sustavu laser se koristi kao izvor topline i služi za zagrijavanje materijala, što potiče i ubrzava elektrokemijsku reakciju. U eksperimentu Pajaka i De Silve laserom se stvarala lokalna zona utjecaja topline koja je pojačavala proces ECMA, dovodeći do bržeg skidanja materijala i poboljšanja točnosti. [1]

2.1.5. Obrada odvajanjem potpomognuta kriogenim hlađenjem

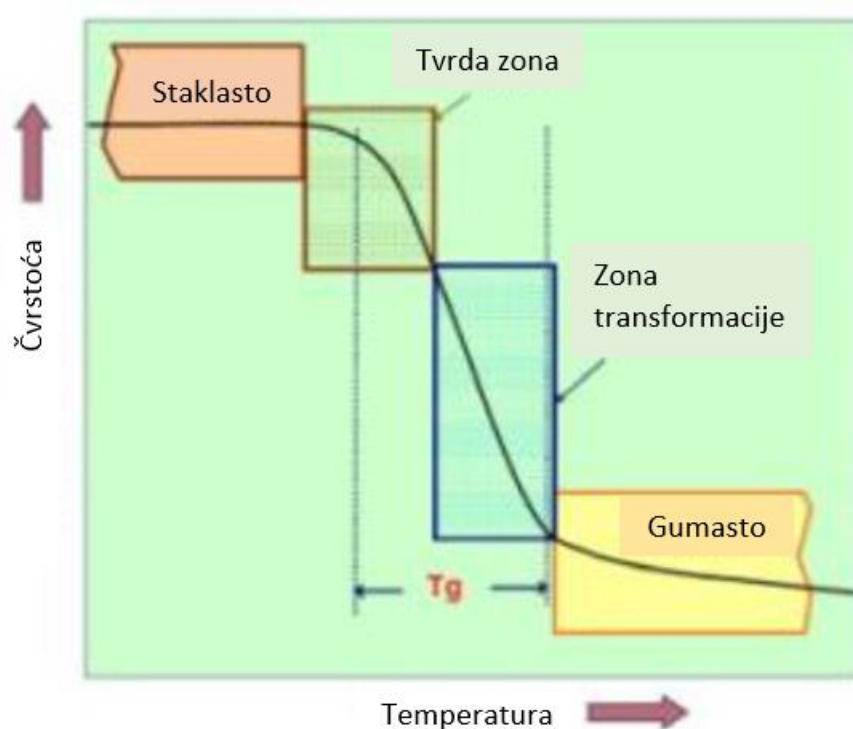
Pod kriogenim obradama se podrazumijeva pothlađivanje materijala u zoni rezanja najčešće medijima tekućim dušikom ili tekućim CO₂. Ovisno o tipu materijala obratka odnosno da li se radi o tvrdom ili mekom materijalu hlađenje stvara drugačiji učinak na obradu. Više o ovome postupku biti će objašnjeno u sljedećim poglavljima. [3]

2.1.5.1. Kriogena obrada odvajanjem tvrdih materijala

Tradicionalne tehnike obrade tvrdih materijala pogotovo keramike i superlegura smatraju se jako zahtjevne zbog ubrzanog trošenja rezne oštrice. U procesu trošenja alata veliku ulogu imaju vrlo visoke temperature koje se stvaraju u zoni rezanja. Upotreba kriogenog hlađenja kod obrade tvrdih materijala znatno smanjuje temperaturu alata čime se značajno produljuje trajnost oštrice reznog alata, a samim time i olakšava se proces obrade tvrdih i kaljenih materijala. [1]

2.1.5.2. Kriogena obrada odvajanjem mekih materijala

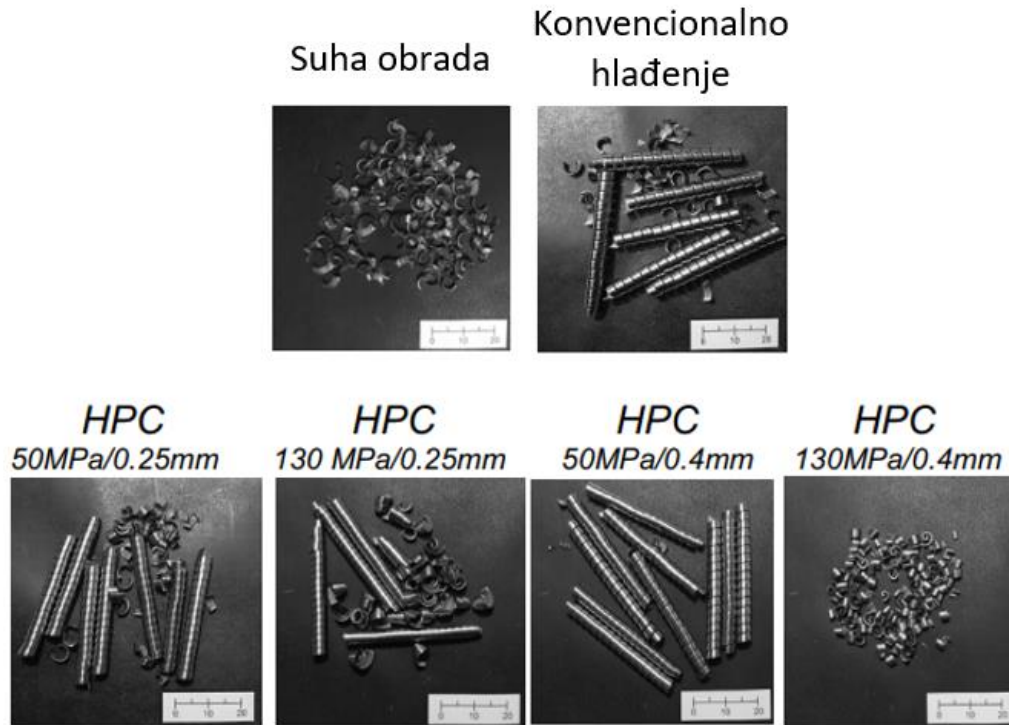
Problem kod obrade mekih materijala, kao što su elastomeri, je što zbog njihove niske tvrdoće i žilavosti, i velike deformacije prilikom pritiska nije moguće ostvariti zadovoljavajuće dimenzije i kvalitetu površine prilikom obrade. Upotrebom kriogenog hlađenja cijelog obratka dolazi do potpune promjene unutar materijala u krhku strukturu. Na slici 5. pokazan je graf ovisnosti čvrstoće o temperaturi materijala. Na grafu se može vidjeti tvrda zona, ona predstavlja željeno područje obrade. Pritom se nastoji biti što bliže stanju staklaste strukture, ali da se ne prijeđe u to stanje. To povećava čvrstoću obratka i omogućuje obradu konvencionalnim postupcima obrade odvajanjem. Uz već navedeno dolazi do boljeg formiranja odvojene čestice uz manju mogućnost stvaranja naljepka na alatu. [32]



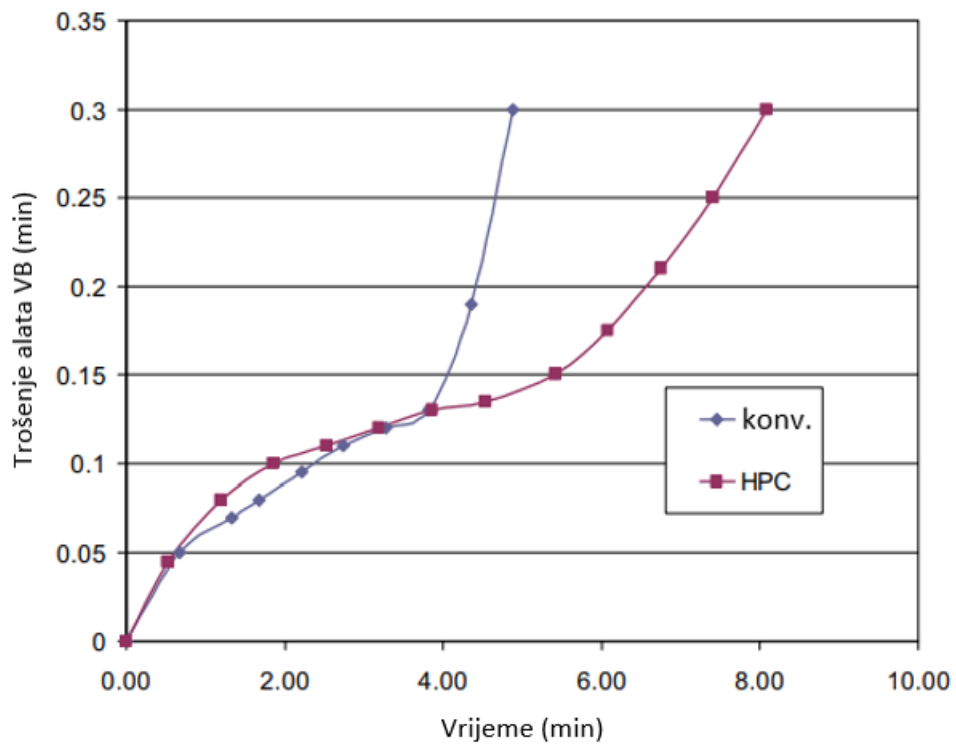
Slika 5. Graf ovisnosti čvrstoće o temperaturi [32]

2.1.6. Obrada odvajanjem potpomognuta visokotlačnim hlađenjem

Visokotlačno hlađenje (HPC – *High Pressure Cooling*) je efektivan način da se poboljšaju uvjeti postupaka obrade odvajanjem u pogledu sila rezanja, nastanka odvojene čestice i vijeka trajanja alata. Prikazano na slici 6. vide se razlike u odvojenoj čestici kod različitih vrsta hlađenja. Zadnji tip HPC obrade s tlakom od 130 MPa i promjerom mlaznice 0.4 mm ostvaruje najbolje rezultate te stvara sitnu nasječenu odvojenu česticu. Vijek alata se jako produljuje za razliku od onog kod konvencionalnog hlađenja (prikazano na grafu na slici 7.) pri čemu se najveće razlike vide kod duljih vremena obrade. [33]



Slika 6. Razlike u izgledu odvojene čestice kod tokarenja Inconela 718 [33]



Slika 7. Omjer trošenja alata i vremena obrade [33]

2.1.7. Kriogena obrada odvajanjem potpomognuta laserom ili plazmom

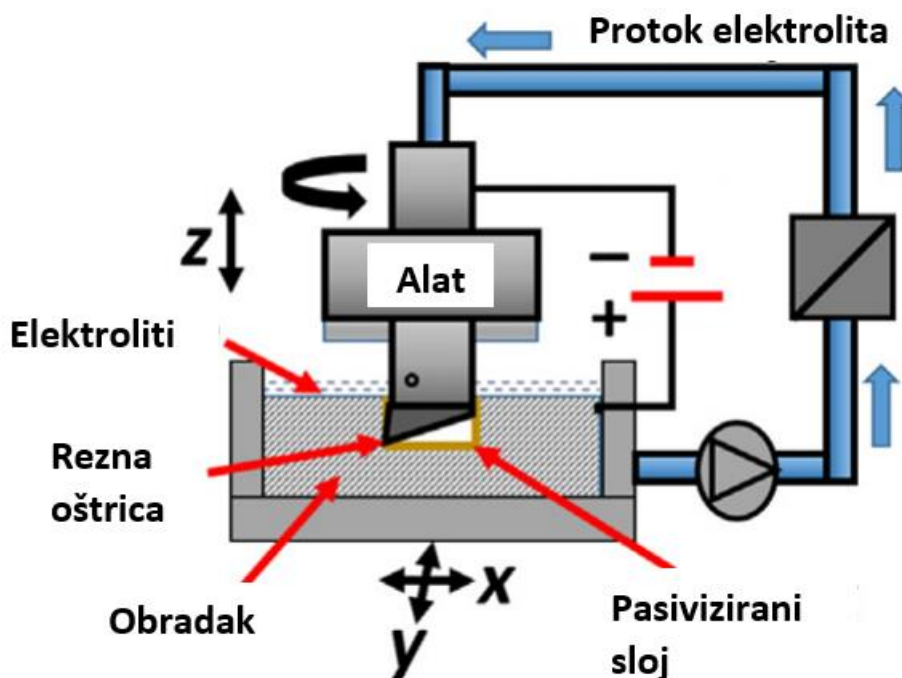
U novije vrijeme provedena su ispitivanja hibridnih obrada u kombinaciji kriogenih obrada odvajanjem čestica potpomognuti laserom ili plazmom. Istraživane su hibridne obrade glodanja legura titana i hibridne obrade tokarenja Inconela 718. Navedenom kombinacijom zagrijavanja obratka i istovremenog kriogenog hlađenja alata obradnog stroja, dobiven je sustav sposoban za obradu teško obradivih tvrdih materijala. [1]

2.2. Kombinirani hibridni procesi

Kombinirani procesi sadrže dva ili više procesa koji se odvijaju u isto vrijeme. U ovu skupinu spadaju procesi koji kombiniraju skidanje i transformaciju materijala.

2.2.1. ECM (Electro Chemical Machining) i obrada odvajanjem

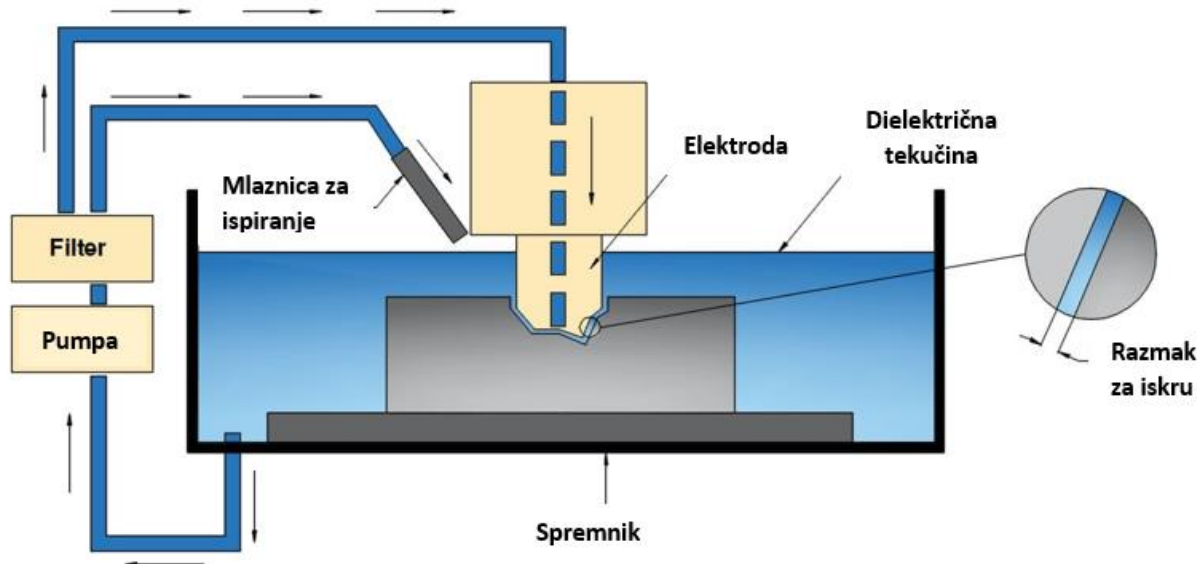
Hibridni sustav obrade koji kombinira ECM i obradu odvajanjem kao završnu obradu predstavlja napredak u obradi teško obradivih tvrdih materijala kao Ti6Al4V koji se pasivizira prilikom procesa ECM-a (skica procesa prikazana na slici 8.). U takvom sustavu, materijal se većinom skida elektrokemijskim otapanjem tankog sloja materijala nakon čega slijedi glodanje ili brušenje. Pažnja se mora posvetiti reznoj oštrici koja treba biti kompatibilna s ECM-om i glodanjem, oštrica mora biti izrađena od materijala s vrlo niskom električnom vodljivošću kako ne bi dolazilo do kratkog spoja prilikom kontakta rezne oštrice s obratkom. [26]



Slika 8. Skica hibridnog procesa obrade odvajanjem i ECM-a [26]

2.2.2. EDM (Electric Discharge Machining) i obrada odvajanjem

U ovom hibridnom sustavu EDM je primarni proces koji skida materijal uporabom električnog pražnjenja između katode i anode, odnosno između alata i obratka. Prilikom čega dolazi do iskrenja između alata i obratka, te otkidanja komada materijala (prikazano na slici 9.). Uz navedeno dolazi i do sekundarne obrade odvajanjem koja se kao i u prethodno objašnjenim poglavljima obavlja s ciljem obrade mikro značajki na tvrdim i krhkim strukturama koje su prije bile teško ili gotovo nikako obradive. [37]



Slika 9. Skica EDM-a [36]

2.2.3. Rezanje laserom i obrada odvajanjem

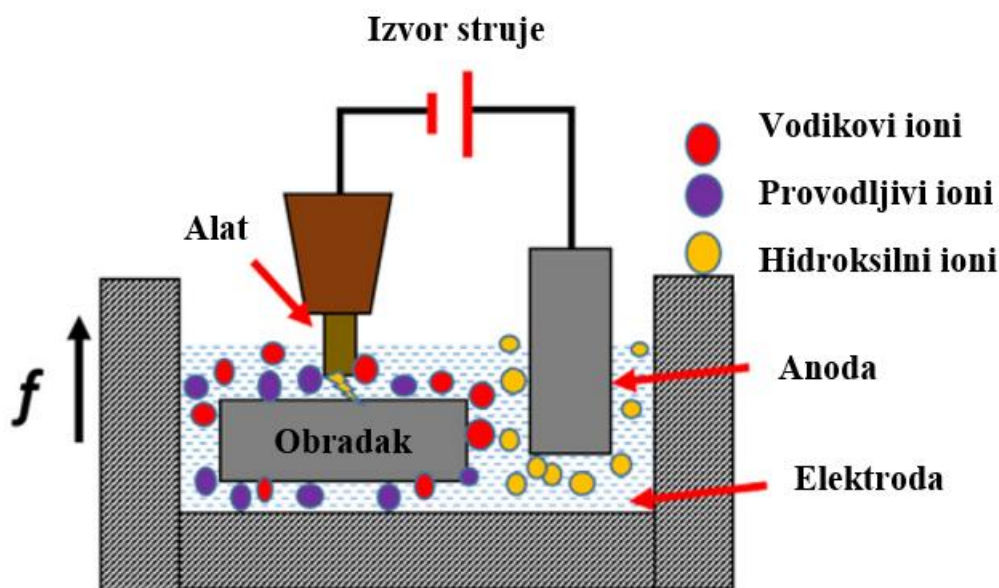
Uz obradu vodenim mlazom rezanje laserom jedna je od najčešće korištenih obrada za pripremu materijala za daljnju obradu kao i za proizvodnju gotovih obradaka. Prednost rezanja laserom je stvaranje reza velike preciznosti kod kojeg nema trošenja alata. Kombinacijom laserskog rezanja i obrade odvajanjem smanjuje se trošenje reznog alata te mu se produljuje vijek trajanja i tako se postiže bolja kvaliteta površine. Nedostatak ove obrade je nemogućnost rezanja reflektivnih materijala primjerice bakra i bronce. U industriji se ovaj proces najviše koristi za stvaranje metalnih mikro komponentata i mikro značajki. [1]

2.2.4. Rezanje laserom i EDM ili ECM

Lasersko rezanje kombinirano je još i s EDM-om ili ECM-om. Rezanje laserom je široko korišten proces obrade, ali ima svoje mane. Prilikom rezanja stvaraju se negativne posljedice u zoni utjecaja topline i dolazi do prskanja materijala. Svrha stvaranja hibridnog sustava je eliminacija gore navedenih negativnih posljedica. Uklanjanjem tih negativnih posljedica stvara se homogeni rez koji nije potrebno naknadno toplinski obrađivati te se dodatno skraćuje vrijeme obrade. [1]

2.2.5. EDM i ECM

Hibridni obradni sustav EDM-a i ECM-a može se nazvati i ECDM (*Electro Chemical Discharge Machining*). Primarni proces kod ove obrade je EDM koji stvara defekte na površini obratka u obliku mikro pukotina i rekristaliziranog površinskog sloja materijala. Tako se unose nepravilnosti u materijal koje je potrebno ukloniti. Kako bi se uklonili takvi defekti potreban je proces završne obrade tehnologijom ECM-a. Sustav se temelji na električnom pražnjenju (prikazano na slici 10.) između katodne elektrode i anodnog obratka kojim se skida površinski sloj materijala, i istovremenog elektrokemijskog topljenja površine obratka. [26]



Slika 10. Skica ECDM-a [26]

2.2.6. Brušenje i otvrdnjavanje

Ova hibridna obrada stvorena je specifično za obradu zakaljivih čelika. Brusno kolo se koristi kod primarnog procesa brušenja kao pomični i rotirajući alat koji prilikom obrade zbog trenja stvara veliku količinu topline. Stvorena toplina, u drugim procesima izgubljena, koristi se za zagrijavanje površine čelika iznad temperature austenitizacije. Nakon toga čelik se na zraku samozakaljuje ili se zakaljuje korištenjem sredstva za hlađenje i dolazi do pretvorbe strukture materijala u tankom površinskom sloju u martenzit uslijed samog procesa obrade. Ovaj hibridni stroj potpuno iskorištava energiju unesenu u sustav i tako stvara ekonomičniju obradu s manjim gubicima. [1]

2.3. Aditivni hibridni procesi

Većina hibridnih proizvodnih procesa korištenih u industriji danas se bazira na nekoj od aditivnih tehnologija. Aditivni procesi su započeli s proizvodnjom raznih proizvoda od polimera,

a danas se obrađuju razni materijali. Takvi proizvodi ili nisu mogli biti proizvedeni drugim procesima zbog nemoguće geometrije ili je želja bila što brže doći do prototipa novog proizvoda. Zadnjih godina aditivna proizvodnja se sve više upotrebljava kod raznih metala i keramike, prvobitno za prototipe, a danas i kao industrijska proizvodnja gotovih komada. Najveći nedostatak aditivnih tehnologija je lošija kvaliteta površine i veće tolerancije. Kombinacijom aditivnih procesa s drugim procesima obrade omogućuje se izrada gotovog proizvoda na jednom stroju, s odličnom kvalitetom površine i tolerancijama.

2.3.1. Taljenje nanesenog materijala

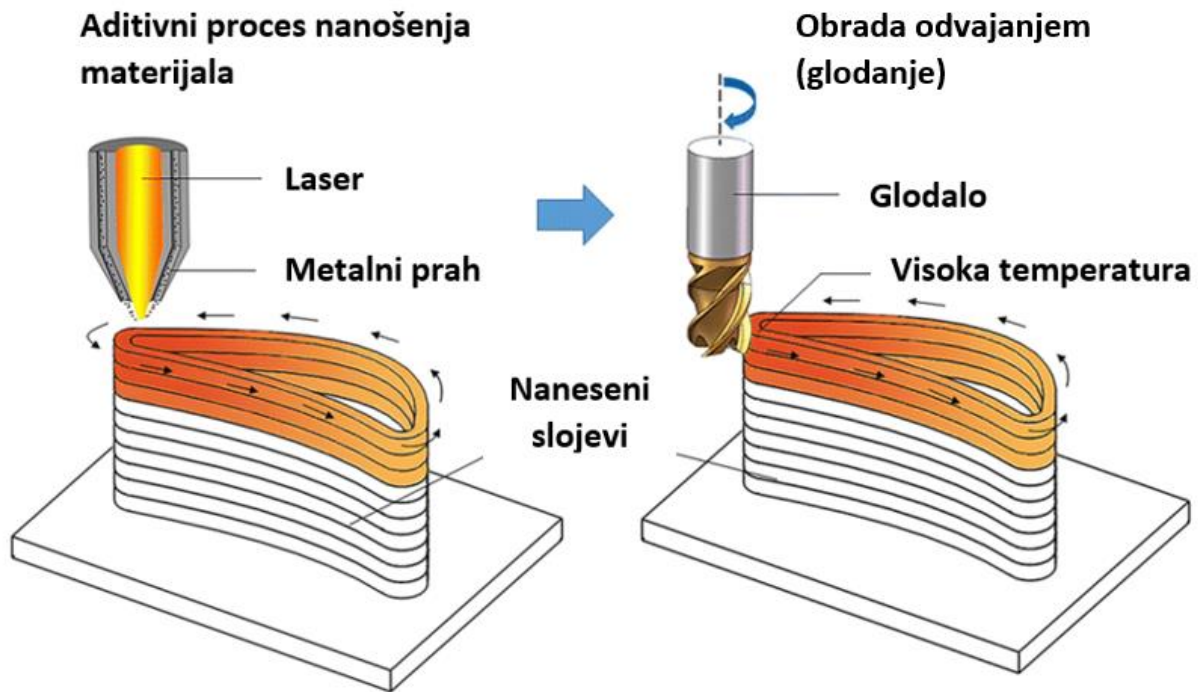
Kod aditivne obrade nanošenje materijala odvija se pomoću dvije metode. Jedna metoda je nanošenje nerastaljenog materijala i zatim njegovo taljenje, a druga taljenje materijala te naknadno nanošenje. Uzimajući u obzir ove dvije metode postoje razne kombinacije procesa. Glavne razlike su u izvoru topline za taljenje materijala, a one mogu biti laseri, elektrolyčno zavarivanje i plazma za metale i keramiku ili razni grijači za polimere kod kojih je potrebna manja količina energije za taljenja. Ovim procesima moguće je nanositi materijal na već izrađeni predmet, a moguća je i izrada potpuno novog predmeta. Upotrebom posebnih glava s dva ili više materijala ili s više glava za nanošenje na jednom stroju ostvaruje se mogućnost nanošenja više različitih materijala u jednoj obradi i njihovo povezivanje. Različitim procesima nanošenja materijala poboljšava se otpornost na koroziju, otpornost na trošenje i vlačna čvrstoća, a uz navedeno podrazumijeva se i ušteda energije uz manju potrošnju materijala. [1]

2.3.2. Hibridni aditivni proizvodni procesi s obradom odvajanjem

Aditivna proizvodnja uz obradu odvajanjem predstavlja danas jednu od najraširenijih hibridnih obrada koje se koriste u industriji. Zbog mogućnosti izrade obradaka kompleksnih geometrijskih značajki aditivna proizvodnja danas je u ekspanziji. S druge strane obradom odvajanjem čestica moguće je postići uske tolerancije oblika i položaja te zadovoljavajuću kvalitetu površine. Upravo kombinacijom ove dvije tehnologije moguće je dobiti skoro sve oblike i kvalitete obrađene površine komada kompleksne geometrije.

2.3.2.1. Aditivna proizvodnja taljenjem metala i obrada odvajanjem

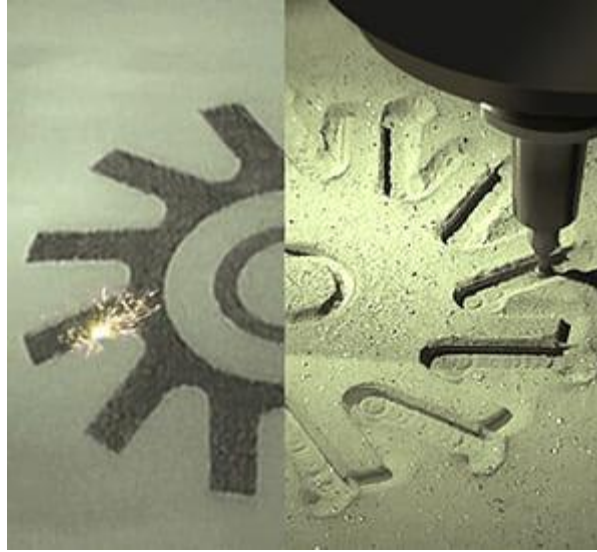
Upotrebom lasera ili elektrolyčnog zavarivanja kao aditivnog procesa i prvog koraka u ovom hibridnom procesu materijal se nanosi na polugotov proizvod i stvara se obradak koji je približno točnih dimenzija, te ga je potrebno samo završno obraditi na konačne dimenzije (prikaz procesa je na slici 11.). Završna obrada se vrši najčešće postupkom glodanja čime se dobivaju izradci točnih dimenzija s traženom kvalitetom površine. Kombinacija ovih tehnologija omogućuje nanošenje raznih materijala različitih svojstava na jedan obradak i izradu proizvoda točno određenih specifikacija i svojstava. Ovakvi procesi se u industriji najviše koriste za popravke dijelova čija je proizvodnja iznimno skupa primjerice lopatica turbinskih rotora. [1]



Slika 11. Skica procesa laserskog navarivanja i glodanja [29]

2.3.2.2. Selektivno lasersko taljenje i obrada odvajanjem

Kod ovog postupka koristi se tehnologija SLM-a (*Selective Laser Melting*) aditivne izrade proizvoda koja je prvi korak u ovom hibridnom sustavu. SLM je aditivna tehnologija koja koristi metalni prah nanoseći ga sloj po sloj na radni stol. Metalni prah se zatim tali vanjskim izvorom topline, najčešće laserom. Postoje dva načina završne obrade, u prvom se nakon svakog ili nakon nekoliko slojeva glodalom obradi vanjska površina obratka. Drugi način proizvodnje predmetnih obradaka izvodi se u dva koraka, cjelokupnim 3d printanjem predmetnog komada, a tek onda obradnim postupkom glodanja. Izvođenje printanja i glodanja naizmjenično, svakih nekoliko slojeva daje veću točnost i manje trošenje alata dok drugi slučaj rezultira bržim vremenom izrade. Slika 2. prikazuje prvi slučaj, lijevo proces SLM-a, a desno glodanja. Na kraju obrade proizvod ostaje u neiskorištenom metalnom prahu (prikazano na slici 13.) koji je moguće naknadno reciklirati i ponovno koristiti. [1]



Slika 12. Lijevo SLM, desno glodanje [2]



Slika 13. Proizvod u metalnom prahu nakon procesa SLM-a [28]

2.4. Hibridni procesi oblikovanja deformiranjem

Ova skupina je posebno izdvojena jer za razliku od ostalih skupina kod oblikovanja deformiranjem nema skidanja ili nanošenja materijala, već samo pretvorba iz jednog oblika u drugi.

2.4.1 Oblikovanje limova deformiranjem potpomognuto vanjskim izvorom topline

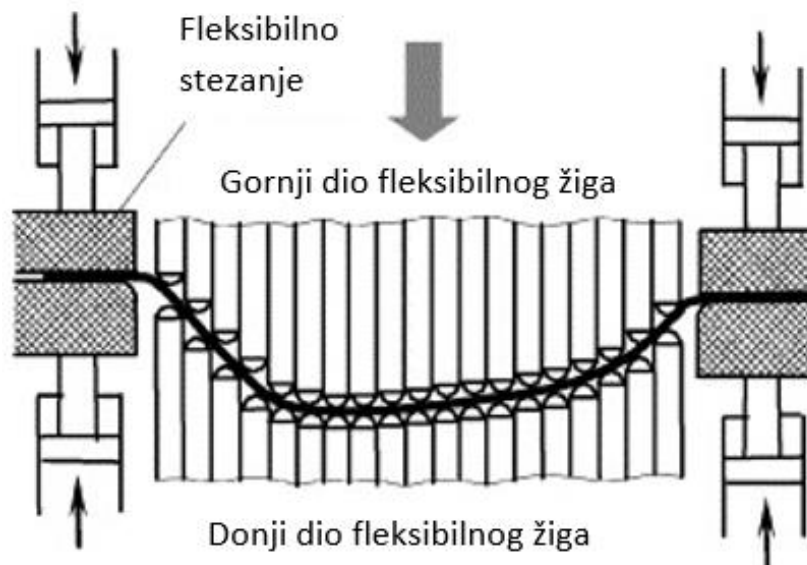
Svaki proces oblikovanja lima deformiranjem ima svoju specifičnu upotrebu u pogledu nastalih značajki izratka. U dostupnim radovima najviše istraživani proces je upotreba lasera kao toplinske obrade i istovremeno deformiranje lima. Toplina koja nastaje upotrebom lasera pomaže kod promjene mikrostrukture obrađivanog materijala i njegovih mehaničkih svojstava. Takvom kombinacijom tehnologija može se poboljšati tečenje, smanjiti naprezanje na određenoj površini i smanjiti broj potrebnih koraka kod deformiranja. [1]

2.4.2. Rezanje potpomognuto laserom

Kao i u prijašnjem hibridnom procesu iz ove skupine, laserska zraka se koristi za zagrijavanje materijala, no ovaj put s donje strane linije rezanja pločastog priprema. Tim se postupkom omekšava materijal nakon čega je žigu za rezanje potrebna manja sila kako bi prerezao materijal. Zagrijavanjem prije samog procesa rezanja zapaženo je veliko smanjenje sila rezanja i savijanja rubova obratka, uz dužu postojanost žiga. [1]

2.4.3. Duboko vučenje i obrada odvajanjem

Duboko vučenje sa segmentiranom matricom kombinira se s postupkom glodanja s ciljem iznalaženja bolje dimenzijske točnosti kao i hrapavosti površine. Promjenjivi kalup se izrađuje tako da se oblik obratka aproksimira koristeći niz pomičnih šipki koje su pozicionirane jedna do druge i daju oblik kalupa (skica segmentirane matrice prikazana na slici 14.). Poslije procesa dubokog vučenja žig se odmiče i šipke se povlače, a glodalo se primiče i obrađuje potrebne površine na odgovarajuće tolerancije. [30]



Slika 14. Formiranje u kalupu u više točaka istovremeno sa segmentiranom matricom [30]

2.4.4. Glodanje i oblikovanje deformiranjem

Ovo je hibridni postupak kojem je prvi korak glodanje elemenata malog presjeka na željenu debljinu i točnost, a zatim savijanje ili razvlačenje tih tankih elemenata u drugom koraku kako bi se dobio konačni oblik poluproizvoda ili konačnog proizvoda. Ovim postupkom omogućena je jednostavna izrada značajki na proizvodu kao što su tanki zidovi, lukovi i drugo koji su inače zahtjevni za izradu. [1]

3. HIBRIDNI OBRADNI SUSTAVI U INDUSTRIJI

Dosadašnjim tekstom u ovom radu obuhvaćene su sve kombinacije hibridnih obrada koje se rade u eksperimentalnom okruženju i vrlo malo njih je danas u industrijskoj primjeni. U ovom poglavlju istražiti će se specifični hibridni obradni strojevi najviše korišteni u industriji danas. Kada se spominje industrijska primjena svakako treba navesti grane u kojima su hibridne obrade značajnije prisutne kao što su: zrakoplovna, automobilska, vojna i medicinska industrija, dok se u drugim industrijama sporije uvode zbog potrebnog velikog početnog kapitala. [4] Kako bi se naglasio značaj ovih sustava obrade važno je znati da očekivani godišnji porast od 2019. do 2028. iznosi 21%, za razliku od drugih sustava obrade materijala kod kojih iznosi najviše 10%, što se pokazalo točno do danas. Uz to najbrže rastuće tržište je Europa, dok je najveće trenutno tržište Sjeverna Amerika. [5]

3.1. Najviše korišteni hibridni sustavi danas

Istraživanjem tržišta i radova vezanih za tržište hibridnih sustava zaključeno je da se danas u industriji najviše koriste aditivni hibridni obradni sustavi. Pokazatelji koji su uzeti u obzir su najveće kompanije koje prodaju hibridne strojeve, broj prodanih komada i njihova zarada. Od 10 najvećih kompanija koje se bave hibridnim strojevima 9 ih se bavi kombinacijom s aditivnom obradom, a jedna s ultrazvučnom obradom. [6] U pogledu prodanih komada, kompanije s aditivnim hibridnim strojevima prodaju daleko više od bilo koje druge grane. Pogledom samo na kompaniju DMG Mori koja je najveći proizvođač hibridnih obradnih strojeva, može se doći do zaključka da većina zarade dolazi od aditivnih hibridnih strojeva, a nju prati zarada od ultrazvučnih hibridnih strojeva. [7]

4. ADITIVNI HIBRIDNI OBRADNI STROJEVI

U poglavlju 2.3. navedeni su svi mogući procesi aditivne hibridne obrade i vidi se da su ti procesi kombinacija raznih aditivnih tehnologija i tehnologija obrade odvajanjem. Ovakva tehnologija pojavila se zbog sve strožih zahtjeva tržišta na fleksibilnost i što kraće vrijeme izrade konačnog proizvoda. Aditivnom tehnologijom izrađuju se proizvodi zahtjevne geometrije s mogućnošću izrade unutarnje geometrije dijelova, a kombiniranjem sa završnom obradom odvajanjem ostvaruju se zahtijevane tolerancije i kvaliteta površine. Dodatna prednost ovakvih sustava koji prate trend tržišta je mogućnost masovne, ali i maloserijske proizvodnje bez narušavanja kvalitete.

Danas postoji nekoliko proizvođača aditivnih hibridnih obradnih strojeva koji se ističu, a najveći su DMG Mori, Mazak, Matsuura, 3D-Hybrid, Optomec i Sodick, a njihovi najznačajniji predstavnici bit će obrađeni u sljedećem poglavlju. Pokazat će se izvedbe i objasniti će se način rada svakog stroja, dajući uz to njihove karakteristike.

4.1. LASERTEC 65 DED hybrid

Kompanija DMG Mori je vođa u proizvodnji alatnih strojeva, ali može se reći da je predvodnik i u ovoj grani. Kao gotov proizvod na tržište stavlja DED (*Direct Energy Deposition*) hibridni aditivni obradni stroj LASERTEC 65 DED hybrid, kojeg je kompanija prvi put predstavila 2015. godine.

Ovaj stroj koristi potpuno automatiziranu DED lasersku glavu snage 3000 W koja ne treba nikakvu ručnu intervenciju. Kroz samu glavu dovodi se materijal u obliku praha na određeno mjesto i rastaljuje. Glava u sebi ima senzor dobave praha kako bi se osigurala konstantno ista svojstva i količina praha, stvarajući homogenu strukturu izratka. Uz pet-osno nanošenje s koaksijalnom mlaznicom i dobavu materijala kroz samu glavu lasera, moguća je homogena distribucija praha neovisno o smjeru nanošenja i orijentaciji lasera. Nakon završetka postupka aditivne proizvodnje, laserska glava se miče iz radnog prostora stroja te se oslobađa volumen potreban motorvretenu koje vrši obradu odvajanjem. Cijeli stroj zauzima površinu od 12 m², a pokreće ga motor snage 19 kW. Maksimalna brzina vrtnje glavnog vretena je 20000 min⁻¹. Radni prostor je 735 mm po x-osi, 650 mm po y-osi i 560 mm po z-osi i ima okretno nagibni stol. Maksimalna masa radnog komada može biti 600 kg, a njegova visina ne smije premašiti 400 mm. Uz sve to integrirana je i termalna kamera koja snima cijelu radnu površinu i omogućuje praćenje svakog koraka procesa. Sustav je opremljen Siemens NX-om, kompletnim hibridnim CAD/CAM softverskim paketom koji se koristi za pripremu i provedbu cijelog procesa od dizajna i modeliranja proizvoda, preko aditivnog procesa do završnog procesa obrade odvajanjem čestica. Proces obrade u dva koraka na ovom stroju prikazan je na slici 15. [8]



Slika 15. LASERTEC lijevo lasersko navarivanje, desno glodanje

4.2. INTEGRIX i-400 AM

Mazak je korporacija s iskustvom u proizvodnoj industriji još od 1970-ih godina, sa sjedištem u SAD-u. Na tržište je 2015. godine prvi put izbacila aditivni hibridni stroj INTEGRIX i-400 AM.

Mazakov hibridni aditivni stroj pete generacije vidi se na slici 16. i specifičan je po tome što ima dva vretena, jedno glavno za tokarenje snage 30 kW, uz maksimalnu brzinu vrtnje od 3300 min^{-1} na kojem se pri manjim brzinama izvodi i lasersko navarivanje, i drugo za glodanje snage 22 kW, maksimalne brzine vrtnje 12000 min^{-1} . Mogućnost pomaka u x-osi je 615 mm, u y-osi 260 mm i u z-osi 1585 mm. Ima automatsku izmjenu alata na drugom vretenu, na kojem ima i dvije laserske glave za nanošenje materijala. Jedna služi za nanošenje velike količine materijala u kratkom vremenu, a druga za fino nanošenje male količine materijala i lasersko graviranje kao dodatne funkcije. Laserske glave imaju poseban spremnik u koji se automatski spremaju nakon kraja korištenja, koji ih čuva da ne dođe do oštećenja prilikom naknadne obrade. [9]

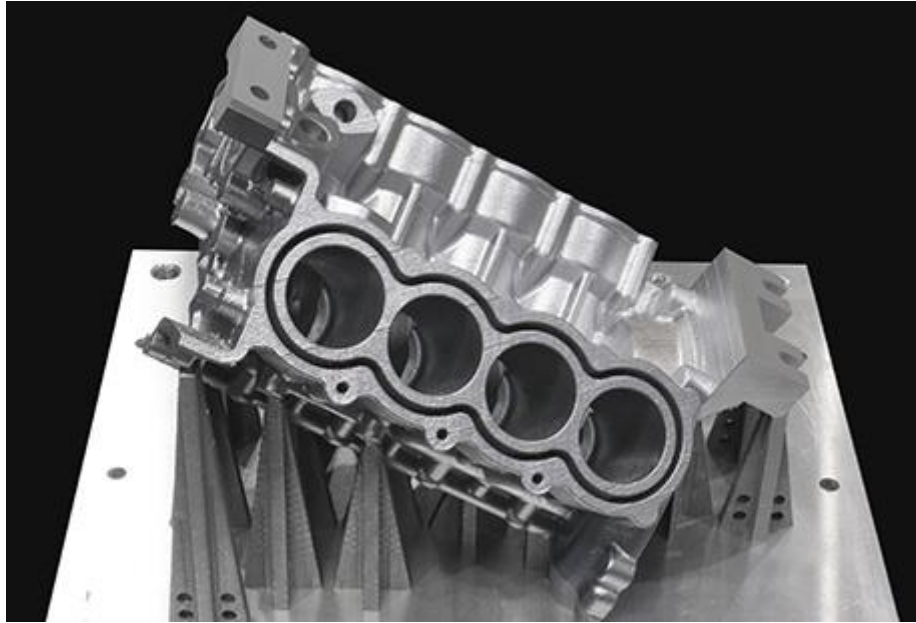


Slika 16. INTEGREX i-400 AM

4.3. LUMEX Avance-60

Matsuura je kompanija koja je 2002. prva na svijetu na tržište izbacila hibridni metalni 3D pislač s naknadnim glodanjem, imena M-PHOTON 25Y. Koristio se za izradu kalupa i smanjio je vrijeme izrade na 1/3 vremena trajanja ciklusa normalnog procesa pomoću lasera. Danas je njihov najprodavaniji uređaj u ovoj seriji LUMEX Avance-60.

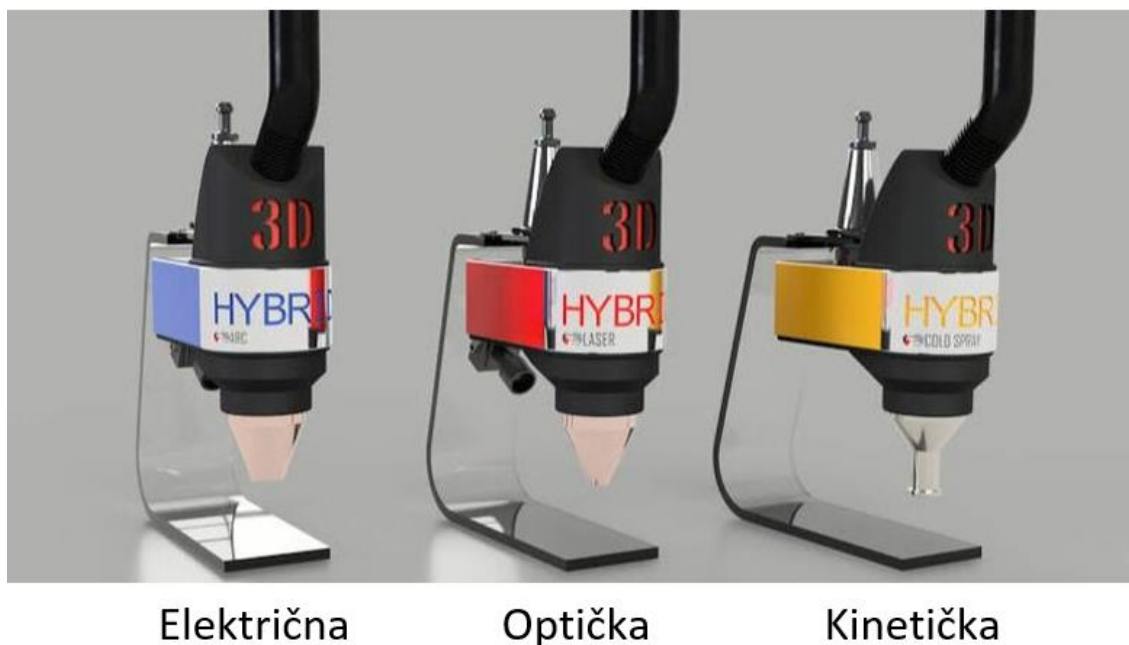
Navedeni hibridni stroj ima veliki radni volumen dimenzija 500 mm po z-osi i 600 mm po x i y-osi, te mogućnošću ispisivanja komada mase do 1300 kg. Na slici 17. može se vidjeti cijeli blok V8 motora, veličine 424 x 317 x 339 mm, izrađen na ovom stroju. Površina koju zauzima ovaj uređaj je 29.046 m², duljine 6.18 m i širine 4.7 m. Stroj se temelji na SLM tehnologiji, to je aditivna tehnologija koja je opisana u poglavlju 2.3.2.2. koja koristi sloj praha na radnom stolu koji se zatim tali vanjskim izvorom topline, u ovom slučaju optičkim laserom snage 1000 W. Prah se nanosi sloj po sloj i nakon svakog nanošenja tali, tako gradeći konačni proizvod. Velika prednost ovog sustava je mogućnost izrade lakih komada stvaranjem unutarnje sačaste strukture i topološki optimiziranih dijelova. Stroj je opremljen motorvretenom snage 4 kW kojem je gornja granica brzine vrtnje 45000 min^{-1} i koristi se za naknadnu obradu. [10]



Slika 17. Blok V8 motora [2]

4.4. 3D Hybrid Solutions glave za aditivnu proizvodnju

Početni cilj ove kompanije bio je davanje usluga izrade proizvoda na hibridnim aditivnim obradnim strojevima, ali danas se bave proizvodnjom i prodajom laserskih i elektrolučnih glava za navarivanje, te glava za hladno naštrcavanje, namijenjenih za ugradnju u već postojeći CNC uređaj, tako stvarajući hibridni obradni sustav. Svaka glava koristi drugačiju metodu fokusiranja energije, električnu, optičku i kinetičku, prikazano na slici 18. može se vidjeti svaki tip glave s pripadajućom metodom fokusiranja energije.



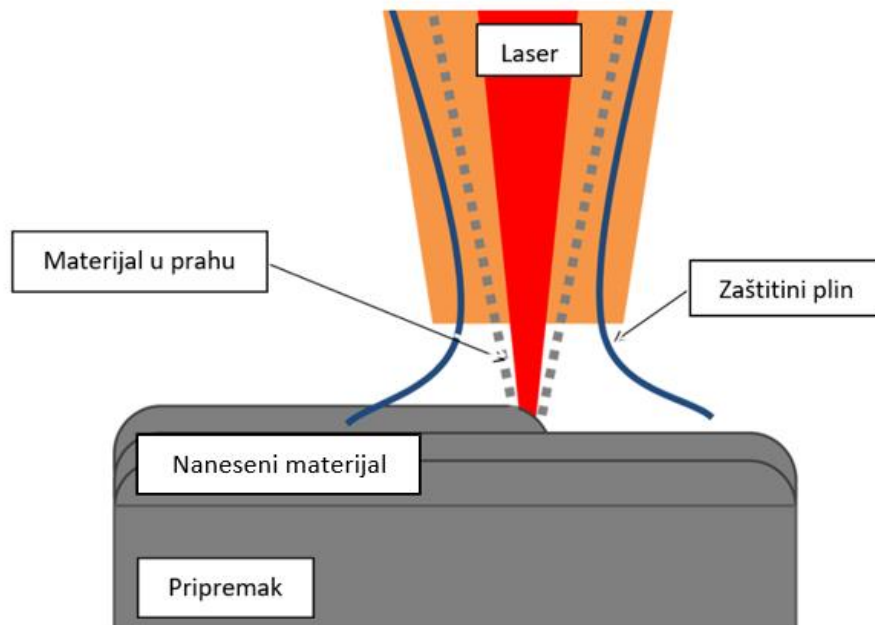
Slika 18. Vrste 3D Hybrid glava [11]

4.4.1. Elektrolučne glave

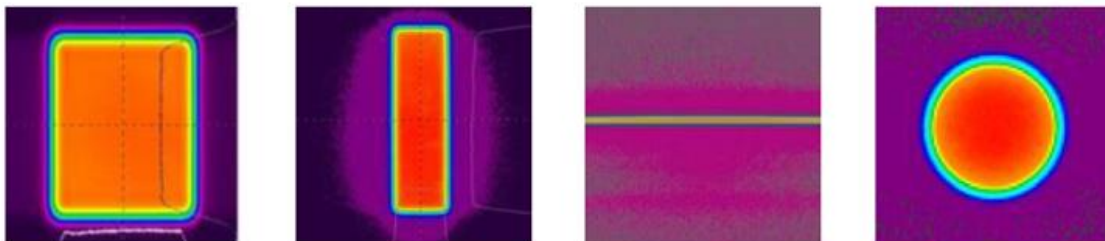
Trenutno u procesu patentiranja ove glave su bazirane na tehnologiji električnog pražnjenja. Materijali koji se inače koriste u glavama za aditivnu obradu moraju biti u obliku žice, no svi materijali nisu dostupni u obliku žice i ne printaju se svi materijali jednako dobro. Iz tog razloga proces koji se patentira je specifična dobava istovremeno i materijala u obliku žice i materijala u prahu. Ovakvom dobavom moguće je stvaranje legure prilikom samog procesa nanošenja materijala. Brzine nanošenja materijala su $35 \text{ in}^3/\text{h}$ ($574 \text{ cm}^3/\text{h}$), a mogu se nanositi razni materijali na primjer aluminijske legure, legure čelika, superlegure na bazi nikla i druge. [11]

4.4.2. Laserske glave

3D Hybrid laserske glave imaju opciju snage od 500 do 25000 W. Materijal se dovodi u obliku praha u struji zaštitnog plina, kao što je prikazano na slici 19. Svaka glava u sebi ima ugrađenu kontrolu temperature kako ne bi došlo do oštećenja glave ili materijala. Laserska zraka može biti različitih veličina (od 0.1 mm do 10+ mm), a osim toga i oblik zrake može biti prilagođen (kružni, pravokutni ili kvadratni, prikazano na slici 20.) ovisno o namjeni. Dodatno je moguća ugradnja antigravitacijske mlaznice, koja se koristi za printanje pod kutevima većim od 90° u odnosu na horizontalu. [11]



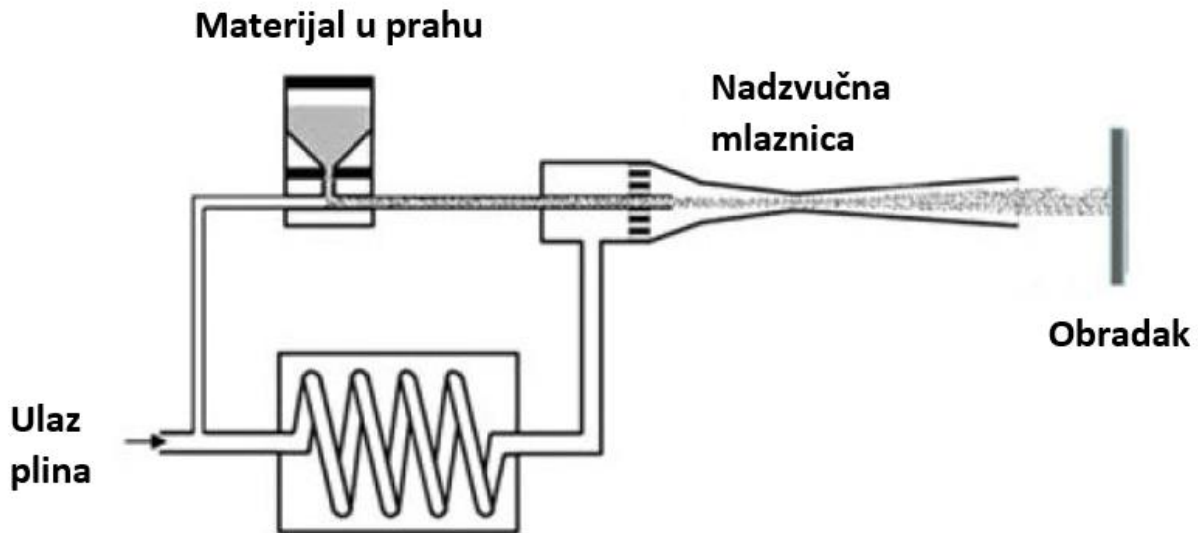
Slika 19. Prikaz postupka laserskog zavarivanja [11]



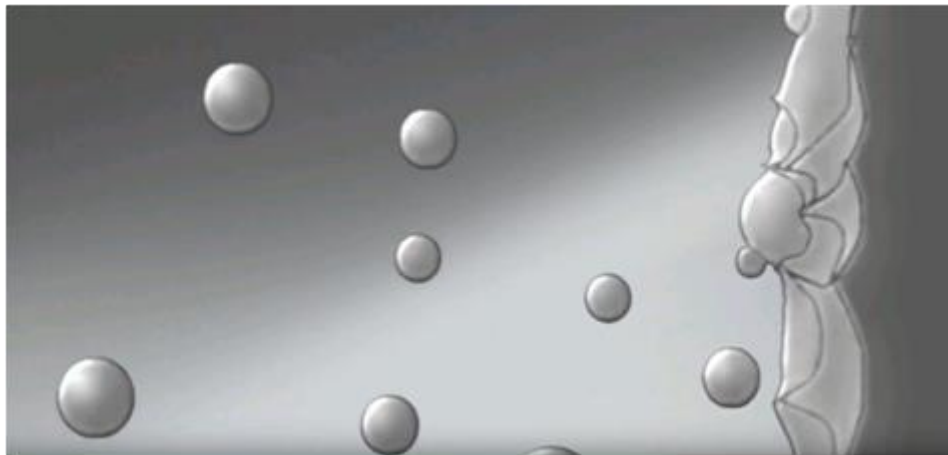
Slika 20. Oblici laserske zrake [11]

4.4.3. Glave za hladno naštrcavanje

Proces hladnog naštrcavanja je prvobitno napravljen za oblaganje vratila tankim slojem materijala, ali se koristi danas i kao aditivna tehnologija. Proces koristi materijale u prahu koji se ubrzavaju u plinu na nadzvučne brzine otprilike 1600-3500 ft/s (488-1067 m/s) i zatim sudaraju s obratkom, kao što je prikazano na slici 21. Prilikom sudara čestica materijala s obratkom površina se plastično deformira i čestice se povezuju međusobno i s površinom (prikazano na slici 22.). Brzine nanošenja materijala ovom tehnikom variraju ovisno o procesu, ali tipično su 5 lbs/h (2.27 kg/h), a mogu se izrađivati legure bakra, nikla, aluminijska, titana, niobija, tantala i kompoziti s metalnim matricama. [11]



Slika 21. Tehnologija hladnog naštrcavanja [34]



Slika 22. Sudar čestica s površinom obratka [11]

4.5. LENS 860 HYBRID

Optomec je aktivan na ovoj sceni 3D printanja metala već više od 20 godina i jedan je od prvih proizvođača hibridne aditivne tehnologije s DED sustavom.

Na slici 23. prikazan je najnoviji model Optomec hibridnih sustava LENS 860 HYBRID koji predstavlja najnovije rješenje u pogledu hibridnih strojeva te kompanije. Radni volumen stroja kod postupka glodanja iznosi 860 x 600 x 610 mm, dok je na raspolaganju kod aditivnog procesa radni volumen 598 x 600 x 610 mm. Na sebi ima optički laser velike snage od 3 kW, pomoću kojeg može taliti velike količine materijala i tako smanjuje vrijeme obrade. Napravljen je na bazi postojeće CNC platforme, a sustav inkorporira automatsku izmjenu 16 alata i glavno vreteno snage 6 kW, maksimalne brzine vrtnje od 10000 min^{-1} . LENS 860 HYBRID može dodatno

imati kontroliranu atmosferu unutar radnog prostora, koja se puni argonom kako bi se smanjio utjecaj kisika i vlage. Kontrolirana atmosfera ne dopušta stvaranje uključina prilikom laserskog navarivanja i osigurava konstantnu kvalitetu nanesenog sloja. [13]



Slika 23. LENS 860 HYBRID [13]

4.6. OPM250L

Sodick je kompanija iz SAD-a koja se još od 1976. godine bavi proizvodnjom i prodajom obradnih strojeva. Većinom je orijentirana na EDM strojeve, ali proizvodi i glodalice i najnovije u ponudi hibridne aditivne obradne strojeve za 3D printanje i obradu metala.

OPM250L je Sodick-ov hibridni aditivni obradni sustav (prikazan na slici 24.) sa SLM tehnologijom kao bazom i naknadnim glodanjem kao sekundarnim procesom. Radni volumen mu je 260 x 260 x 260 mm, a moguće je obraditi obradak veličine 250 x 250 x 250 mm. Maksimalna dozvoljena masa praha na obradnom stolu je 90 kg. Opremljen je laserom snage 500 W, a gornja granica brzine vrtnje glodala je 45000 min^{-1} . Nakon završne obrade odvajanjem, sustav sakuplja neiskorišteni materijal u obliku praha iz prostora obrade i reciklira ga. Tako se ostvaruju velike uštede u cijeni materijala i smanjuje se otpad. Softver koji se koristi zove se OS-FLASH Dedicated CAM software. Pomoću njega je moguća izrada modela, dobivanje podataka za lasersku obradu i glodanje, optimiziranje obrade i simuliranje cijelog postupka. [14]



Slika 24. OPM250L [14]

5. PREDNOSTI I NEDOSTACI ADITIVNIH HIBRIDNIH OBRADNIH SUSTAVA

U prošlom poglavlju su navedeni razni hibridni aditivni obradni strojevi danas na tržištu. Ne koriste svi iste tehnologije obrade, pa tako nemaju ni svi iste prednosti i mane. U ovom poglavlju detaljnije će se zagledati u prednosti i mane baznih tehnologija koje se koriste i kako se kombinacijom procesa neki nedostaci smanjuju. Kako bi se što bolje prikazale prednosti i mane hibridnih aditivnih obradnih strojeva napraviti će se tri zasebne SWOT analize, aditivne tehnologije, obrade odvajanjem čestica i aditivne hibridne obrade.

5.1. Aditivna tehnologija

U prošlom poglavlju bilo je riječi o četiri tipa aditivne tehnologije korištene na hibridnim strojevima: SLM, elektrolučno navarivanje, lasersko navarivanje i hladno naštrcavanje. Svaka od tih tehnologija ima svoje zasebne prednosti i mane, a s obzirom na to da je aditivna tehnologija relativno nova u usporedbi s drugim tehnologijama obrade, na njoj je potrebno raditi još dosta istraživanja kako bi se usavršila. U tablicama 1., 2. i 3. prikazane su prednosti i mane svakog od navedenih tipova aditivne tehnologije. Svaka tehnologija ima svoju primjenu i sve su korisne za određeni slučaj obrade.

Tablica 1. Prednosti i Mane SLM-a

SLM	
Prednosti	Mane
<ul style="list-style-type: none"> • Velika fleksibilnost • Lako printanje velikih serija (vrijeme trajanja izrade najviše ovisi o broju slojeva) • Izrada unutarnje geometrije proizvoda • Nema potrebe za suportiranjem • Brza izrada konačnog proizvoda 	<ul style="list-style-type: none"> • Mali broj mogućih materijala za obradu • Čestice materijala štetne za čovjeka i okoliš • Nemogućnost nanošenja materijala na prijašnji proizvod

Tablica 2. Prednosti i Mane Elektrolučnog i Laserskog navarivanje

Elektrolučno i lasersko navarivanje	
Prednosti	Mane
<ul style="list-style-type: none"> • Mogućnost nanošenja materijala na prijašnji proizvod • Materijali u žici lako dobavljivi • Lagano skladištenje materijala i održavanje opreme 	<ul style="list-style-type: none"> • Velika debljina slojeva, zbog čega je manja točnost oblika i dimenzija • Neželjena zaostala naprezanja • Deformacije zbog lokalnog unosa topline

Tablica 3. Prednosti i Mane Hladnog prskanja

Hladno prskanje	
Prednosti	Mane
<ul style="list-style-type: none"> • Kompatibilnost s materijalima osjetljivim na toplinu • Niska razina toplinskog naprezanja • Mogućnost provedbe procesa bez zaštitne atmosfere 	<ul style="list-style-type: none"> • Ograničenja u pogledu površine na koju se može nanositi materijal • Niska razina gustoće i točnosti nanesenog materijala • Krhkost

Tablica 4. SWOT analiza aditivne tehnologije

Unutarnji Faktori	
PREDNOSTI (STRENGTHS) (+)	NEDOSTACI (WEAKNESSES) (-)
<ul style="list-style-type: none"> • Omogućuje izradu dijelova sa zahtjevnijom i kompleksnijom geometrijom, drugim tehnologijama nemoguće za izradu • Velika fleksibilnost, zahvaljujući kojoj je moguća proizvodnja raznih dijelova i proizvoda • Nema potrebe za dodatnom opremom za stezanje, kod SLM-a • Uvelike se smanjuje potrošnja materijala i tako smanjuje zagađenje • Mogućnost upotrebe raznih materijala na jednom proizvodu 	<ul style="list-style-type: none"> • Sporiji i skuplji proces od tradicionalnog procesa obrade • Zahtjeva veliki početni kapital • Nije moguće ostvariti zadovoljavajuće tolerancije i kvalitetu površine, potrebna je naknadna obrada • Nije isplativo za velike obratke
Vanjski Faktori	
PRILIKE (OPPORTUNITIES) (+)	PRIJETNJE (THREATS) (-)
<ul style="list-style-type: none"> • Ima potencijal stvoriti novo tržište i poslovne modele • Tehnologija će postajati sve jeftinija kako će se početi sve više koristiti • Velika je mogućnost implementacije u industriju 4.0 	<ul style="list-style-type: none"> • Dolazak novih tehnologija na tržište koje ju mogu zamijeniti • Cijena obrade usko povezana s cijenom materijala • Mala potražnja na svjetskom tržištu

SWOT analiza prikazana u tablici 4. daje uvid u tržišnu vrijednost i isplativost tehnologije. Iz analize je vidljivo da aditivna tehnologija ima puno prednosti za razliku od mana i da ima odlične prilike za napredak.

5.2. Obrada odvajanjem čestica

Obrada odvajanjem čestica je tip obrade koji je već dugo na tržištu i dobro se znaju prednosti i mane navedene tehnologije. Tablica 5. prikazuje SWOT analizu obrade odvajanjem čestica.

Tablica 5. SWOT analiza obrade odvajanjem čestica

Unutarnji Faktori	
PREDNOSTI (STRENGTHS) (+)	NEDOSTACI (WEAKNESSES) (-)
<ul style="list-style-type: none"> • Odlična kvaliteta površine i tolerancija • Kratko vrijeme obrade • Mogu izrađivati male, srednje i velike serije 	<ul style="list-style-type: none"> • Razvojem novih tvrdih i čvrstih materijala, smanjuje im se produktivnost i obradivost • Velika potrošnja materijala, puno odvojene čestice • Veliki trošak nabave
Vanjski Faktori	
PRILIKE (OPPORTUNITIES) (+)	PRIJETNJE (THREATS) (-)
<ul style="list-style-type: none"> • Mogućnost pružanja ekskluzivnih i različitih proizvoda • Većina proizvoda u industriji prolazi kroz proces obrade odvajanjem • CNC strojevi i alati predstavljaju veliki postotak svjetske ekonomije 	<ul style="list-style-type: none"> • Poznati procesi, velika konkurentnost • Obrada novih teško obradivih materijala • Ekonomska kriza

5.3. Aditivna hibridna obrada

Aditivna tehnologija i obrada odvajanjem imaju svoje zasebne prednosti i mane. Kombinacijom te dvije tehnologije u hibridni sustav pokušavaju se istaknuti prednosti i maknuti mane zasebnih procesa (prikaz SWOT analize aditivne hibridne obrade u tablici 6.).

Tablica 6. SWOT analiza aditivna hibridna obrada

Unutarnji Faktori	
PREDNOSTI (STRENGTHS) (+)	NEDOSTACI (WEAKNESSES) (-)
<ul style="list-style-type: none"> • Spaja dva ili više tipa obrade u jedan proces na istom stroju • Visoko efektivan i fleksibilan sustav • Proizvodi dijelove visoke kvalitete površine i tolerancija • Smanjuje vrijeme obrade jer nema dodatnog vremena transporta • Mogućnost izrade dijelova iz više različitih materijala • Smanjena potrošnja materijala i tako smanjeno zagađenje okoliša 	<ul style="list-style-type: none"> • CAM sustavi i dalje nisu dovoljno dobro razvijeni za više različitih tipova obrade • Zaostala naprezanja stvorena aditivnim procesom mogu se osloboditi naknadnom završnom obradom • Dugo vrijeme pripreme • Poteškoće kod međudjelovanja više obrada jedne za drugom
Vanjski Faktori	
PRILIKE (OPPORTUNITIES) (+)	PRIJETNJE (THREATS) (-)
<ul style="list-style-type: none"> • Jako bitan proces kod materijala otežane obradivosti • Smanjena cijena obrade zbog kraćeg vremena obrade, manjeg trošenja alata i manje potrošnje materijala 	<ul style="list-style-type: none"> • I dalje se treba usavršiti proces i napraviti puno ispitivanja, pogotovo u pogledu kompleksne geometrije • Recikliranje metalnog praha • Potreba za kvalificirani osobljem

Integracijom dvije obrade na jedan stroj najveće se poboljšanje postiglo u vremenu izrade samog proizvoda jer više nema vremena čekanja kod transporta sa stroja na stroj. Osim toga uz tako brzu izradu ne narušava se kvaliteta obrađene površine i tolerancija što se vidi na slici 25. Lijevo je prikaz prije završne obrade i točno se vide slojevi kako je stroj nanosio materijal, a desno je prikaz s uklonjenim neravninama i ujednačenom kvalitetom površine. Osim toga moguće je proizvesti proizvode od više materijala i zahtjevne geometrije s unutarnjom strukturom. Nedostaci koji su ostvareni kombinacijom procesa su duže vrijeme pripreme procesa jer je puno veća kompleksnost i potreba za visokokvalificiranim operaterima strojeva koji trebaju proći posebnu obuku kako bi rukovali takvim uređajima. [15]



Slika 25. Izgled proizvoda prije i poslije završne obrade [35]

6. ZAKLJUČAK

Konkurencija na tržištu stalno raste. Stroži su zahtjevi za kvalitetom obrade i bržim vremenom izrade konačnog proizvoda. Traže se ekonomičnija rješenja s manjim zagađenjem okoliša. Uz to stalno se otkrivaju novi materijali i kompozitne tvorevine koje su teško obradive. Konvencionalni alati i strojevi nisu više u stanju zadovoljiti sve uvjete koje tržište nameće, a novi alati i strojevi se trebaju svakodnevno mijenjati, prilagođavati i poboljšavati kako bi zadovoljili uvjete i konkurirali. Tako se i sve više pažnje posvećuje hibridnim obradnim sustavima. Danas je i dalje hibridna tehnologija poprilično nova. Njome se žele smanjiti nedostaci zasebnih obrada i ostvariti napredak u tehnologiji. Aditivna tehnologija je jedna od najbrže rastućih grana industrije u svijetu danas, pa tako nije čudno da su hibridni strojevi na bazi aditivne tehnologije najviše zastupljeni. U ovom radu pažnja se posvetila aditivnim hibridnim obradnim sustavima najvećih kompanija na tržištu. Opisane su korištene tehnologije i njihove karakteristike. Takvi novi hibridni sustavi uspjeli su otkloniti razne nedostatke zasebnih obrada koje kombiniraju, ali i uz najnaprednije sustave i dalje imaju puno mana i nedostataka koje nije moguće otkloniti. Kako se svijet razvija u budućnosti se očekuju još stroži zahtjevi u svim pogledima obrade i strojevi se trebaju i dalje unaprjeđivati. Jedna od mogućih budućih promjena su hibridni sustavi s mnogo vrsta obrade na istom stroju.

Literatura

- [1] https://purehost.bath.ac.uk/ws/files/11219548/Newman_IJCIM_2013.pdf (pristupljeno 10.1.2023.)
- [2] <https://www.matsuurausa.com/hybrid-cncc-expand-additive-manufacturing/> (pristupljeno 10.1.2023.)
- [3] <http://www.cnccookbook.com.s3-website-us-east-1.amazonaws.com/CCNCNMillFeedsSpeedsWhatIsCryogenicMachining.htm> (pristupljeno 14.1.2023.)
- [4] <https://blog.spatial.com/hybrid-manufacturing> (pristupljeno 15.1.2023.)
- [5] <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/hybrid-additive-manufacturing-machine-market> (pristupljeno 15.1.2023.)
- [6] <https://www.3dprintingmedia.network/the-top-ten-hybrid-manufacturing-companies/> (pristupljeno 20.1.2023.)
- [7] <https://www.bloomberg.com/quote/6141:JP> (pristupljeno 23.1.2023.)
- [8] <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-65-ded-hybrid> (pristupljeno 24.1.2023.)
- [9] <https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400am/> (pristupljeno 24.1.2023.)
- [10] https://www.matsuurausa.com/wp-content/uploads/LUMEX-Avance-25_-LUMEX-Avance-60_E3.0_201908.pdf (pristupljeno 24.1.2023.)
- [11] <https://www.3dhybridsolutions.com/> (pristupljeno 24.1.2023.)
- [12] <https://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/high-pressure-cold-spray-additive-manufacturing?view=full> (pristupljeno 26.1.2023.)
- [13] https://optomec.com/wp-content/uploads/2018/10/LENS-860-Hybrid-CA_WEB1018.pdf (pristupljeno 26.1.2023.)
- [14] <https://sodick.com/product/opm250l/> (pristupljeno 1.2.2023.)
- [15] <https://encyclopedia.pub/entry/35860> (pristupljeno 1.2.2023.)
- [16] <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14216354/hybrid-cncc-expand-additive-manufacturing> (pristupljeno 3.2.2023.)
- [17] <https://www.frontiersin.org/research-topics/33200/advances-in-hybrid-manufacturing-technologies> (pristupljeno 3.2.2023.)
- [18] <https://zir.nsk.hr/islandora/object/fsb:6762/datastream/PDF/view> (pristupljeno 3.2.2023.)

- [19] <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A3700/datastream/PDF/view> (pristupljeno 3.2.2023.)
- [20] <https://www.fortunebusinessinsights.com/hybrid-additive-manufacturing-machine-market-106123> (pristupljeno 4.2.2023.)
- [21] <https://www.lumex-matsuura.com/english/samplework> (pristupljeno 4.2.2023.)
- [22] <https://optomec.com/3d-printed-metals/lens-core-applications/hybrid-manufacturing/> (pristupljeno 4.2.2023.)
- [23] <https://themechninja.com/11/sls-printing-advantages-and-disadvantages/> (pristupljeno 6.2.2023.)
- [24] <https://amfg.ai/2018/05/17/an-introduction-to-wire-arc-additive-manufacturing/> (pristupljeno 6.2.2023.)
- [25] <https://fastech-engineering.com/the-advantages-of-wire-arc-additive-manufacturing> (pristupljeno 7.2.2023.)
- [26] <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/512029> (pristupljeno 10.2.2023.)
- [27] <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/16878132221107812> (pristupljeno 10.2.2023.)
- [28] <https://www.addimen.com/en/3d-printing-metal/aluminium/> (pristupljeno 12.2.2023.)
- [29] https://www.researchgate.net/figure/Additive-and-subtractive-hybrid-manufacturing-process_fig1_340928276 (pristupljeno 12.2.2023.)
- [30] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013602006854> (pristupljeno 12.2.2023.)
- [31] https://www.researchgate.net/publication/230840090_Thermally_Enhanced_Machining_Introduction_Potential_Advantage_and_Future_Scope (pristupljeno 12.2.2023.)
- [32] <https://www.sirris.be/en/inspiration/cryogenic-machining-also-softer-materials> (pristupljeno 13.2.2023.)
- [33] https://www.svjme.eu/?id=4986&ns_articles_pdf=/ns_articles/files/ojs3/1621/submission/1621-1-1952-1-2-20171103.pdf (pristupljeno 13.2.2023.)
- [34] <https://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/high-pressure-cold-spray-additive-manufacturing> (pristupljeno 13.2.2023.)
- [35] <https://isofinishing.com/3d-printing-metal-surface-finish/> (pristupljeno 13.2.2023.)
- [36] <https://www.iqsdirectory.com/articles/edm/edm-machining.html> (pristupljeno 17.2.2023.)

[37]https://www.researchgate.net/publication/307548506_Hybrid_Electric_Discharge_Machining_Processes_for_Hard_Materials_A_Review (pristupljeno 17.2.2023.)