Suvremeni hibridni alatni strojevi

Krog, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:435141

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dominik Krog

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Dominik Krog

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Damiru Ciglaru na pomoći, savjetima i vodstvu prilikom izrade završnog rada.

Također, zahvaljujem se mami, tati, baki, sestri i djevojci, na potpori i razumijevanju tijekom dosadašnjeg studiranja.

Dominik Krog

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DOMINIK KROG** Mat. br.: 0035206899

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Suvremeni hibridni alatni strojevi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modern hybrid machine tools**

Opis zadatka:

U suvremene ali i skupe alatne strojeve svrstavaju se i hibridni alatni strojevi. To su složeni numerički upravljani alatni strojevi koji imaju mogućnost obavljanja aditivnih tehnologija i tehnologija obrade odvajanjem čestica. Prvenstvena im je namjena popravak oštećenih ili istrošenih, visoko vrijednih dijelova na jednom stroju. Aditivnom tehnologijom, pomoću laserskog oblaganja, može se nadomjestiti oštećeni ili istrošeni dio tog skupog dijela, a zatim se tehnologijom obrade odvajanjem čestica taj dio obradi i tako mu se ponovo vrati funkcionalnost.
Potrebno je dati literaturni pregled dostupnih izvedbi hibridnih alatnih 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. studenoga 2020.

Zadatak zadao:
Prof.dr.sc. Damir Ciglar

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA V

POPIS OZNAKA I KRATICA VI

SAŽETAK VII

SUMMARY VIII

1. UVOD 1

2. DEFINICIJA I PODJELA HIBRIDNIH PROCESA 2

3. POTPOMOGNUTI HIBRIDNI PROCESI 3

3.1 Obrada potpomognuta laserom 3

3.2 Obrada potpomognuta medijem 5

3.3 Obrada potpomognuta vibracijom 6

4. KOMBINIRANI PROCESI 8

4.1 EDM i brušenje 8

4.2 Ekstruzija i savijanje 9

5. KONTROLIRANA PRIMJENA PROCESNIH MEHANIZAMA 12

5.1 Brusno otvrdnjavanje 12

5.2 Lasersko oblaganje i glodanje 12

5.2.3.1 Lasertec 65 DED hybrid 14

5.2.3.2 Lasertec 125 DED hybrid 16

5.2.3.3 Lasertec 4300 DED hybrid 17

5.2.3.4 Lasertec 6600 DED hybrid 18

5.2.3.5 Integrex i-400 AM 19

5.3 Hibridna ultrazvučna tehnologija 20

5.3.1.1 Ultrasonic 20 linear 22

5.3.1.2 Ultrasonic 50 23

5.3.1.3 Ultrasonic 65....24
5.3.1.4 Ultrasonic 85....25
5.3.1.5 Ultrasonic 40 eVo linear....26
5.3.1.6 Ultrasonic 210 P....27
5.3.1.7 Ultrasonic mobileBLOCK....28
6. ZAKLJUČAK....30
LITERATURA....31

POPIS SLIKA

Slika 1. Laserom potpomognuto tokarenje [1] 3
Slika 2. Promjena temperature u obradi laserom [5]....4
Slika 3. Usporedba odvojene čestice [5]....5
Slika 4. Kriogena obrada [1] 6
Slika 5. Smjerovi vibracija [7]....7
Slika 6. EDM + brušenje [6] 8
Slika 7. Tekstura površine [5] 9
Slika 8. Usporedba procesa [1]....10
Slika 9. Sile u procesu [1] 10
Slika 10. Lasersko oblaganje [7]....13
Slika 11. Obodno glodanje [14]....13
Slika 12. Lasertec 65 DED hybrid [16]....14
Slika 13. Lasertec obrada [16]....15
Slika 14. Izradak - Lasertec 65 DED hybrid [16]....15
Slika 15. Lasertec 125 DED hybrid [18]....16
Slika 16. Izradci - Lasertec 125 DED hybrid [17] 16
Slika 17. Lasertec 4300 DED hybrid [19]....17
Slika 18. Obrada mlaznice rakete [19]....17
Slika 19. Lasertec 6600 DED hybrid [21]....18
Slika 20. Izradci - Lasertec 6600 [20] 18
Slika 21. Integrex i-400AM [22]....19
Slika 22. Tipovi mlaznice [22] 19
Slika 23. Obrada Integrex i-400 AM [22]....20
Slika 24. Ultrazvučne oscilacije [24] 21
Slika 25. Ultrasonic 20 linear [27] 22
Slika 26. Izradak Ultrasonic 20 linear [27]....23
Slika 27. Ultrasonic 50 [29]....23
Slika 28. Izradak - Ultrasonic 50 [29]....24
Slika 29. Ultrasonic 65 [30]....24
Slika 30. Izradak - Ultrasonic 65 [30]....25
Slika 31. Ultrasonic 85 [31]....25
Slika 32. Izradak - Ultrasonic 85 [31]....26
Slika 33. Ultrasonic 40 eVo linear [32]....26

Slika 34. Izradak - Ultrasonic 40 eVo linear [32] 27
Slika 35. Ultrasonic 210 P [33] 27
Slika 36. Izradak Ultrasonic 210 P [33] 28
Slika 37. Ultrasonic mobileBLOCK [7] 28
Slika 38. Ultrasonic mobileBLOCK u obradi [35] 29

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela hibridnih procesa [1] 2

POPIS OZNAKA I KRATICA

Oznaka	**Jedinica**	**Opis**
ω	kHz	Kutna brzina
3D		Trodimenzionalno
CIRP		College International Pour la Recherche en productique
DED		Direct Energy Deposition
ECM		Electro Chemical Machining
EDM		Electric Discharge Machining
f_{us}	kHz	Frekvencija vibracije
HSK		Hollow taper shank
Ra	μm	Srednje aritmetičko odstupanje profila
T	K	Temperatura
t	s	Vrijeme
V_c	m/min	Glavna brzina rezanja
$V_{c,res}$	m/min	Rezultantna glavna brzina rezanja

-

SAŽETAK

Tema ovog završnog rada su suvremeni hibridni alatni strojevi. Hibridni alatni strojevi su numerički upravljani strojevi koji primjenjuju dvije ili više različite tehnologije na jednom alatnom stroju. Primarni cilj tih strojeva je povećati produktivnost i smanjiti nedostatke koji mogu nastati primjenom odvojenih tehnologija. Strojevi se koriste za nadogradnju i popravak proizvoda te za proizvodnju potpuno novog proizvoda.

Ovaj rad je podijeljen u četiri poglavlja. Na početku su definirani hibridni procesi i dana je njihova podjela na potpomognute i kombinirane procese te kontroliranu primjenu procesnih mehanizama. Potom su obrađeni neki od predstavnika potpomognutih hibridnih procesa te kombiniranih procesa.

Sljedeći dio ovog rada predstavlja kontrolirana primjena procesnih mehanizama čiji su predstavnici lasersko oblaganje i glodanje te ultrazvučna tehnologija. Unutar tog poglavlja predstavljeni su neki hibridni strojevi i date su njihove najvažnije karakteristike.

Ključne riječi: hibridni stroj, različite tehnologije, povećanje produktivnosti, karakteristike strojeva

SUMMARY

A theme of this final paper are modern hybrid machine tools. Hybrid machine tools are numerically controlled machine tools which use two or more different technologies in the same machine. Primary purpose of these machines is to increase productivity and to decrease a number of imperfections that can appear when multiple separated technologies are used. These machines can be used for upgrade and reparation, as well as production of completely new products.

This paper contains four chapters. In first chapter hybrid processes are defined and they are classified as assisted, mixed processes or controlled application of process mechanisms. Then some representatives of assisted and mixed processes are defined.

The next section of this paper covers the controlled application of process mechanisms through laser sintering and milling and ultrasonic machining as examples. In that chapter, some hybrid machine tools are introduced as well as their main characteristics.

Key words: hybrid machine tools, different technologies, increase productivity, machine characteristics

1. UVOD

Tehnologija napreduje iz godine u godinu. Nakon pojave ručnih, strojnih i numeričkih alatnih strojeva bilo je pitanje vremena kada će se pojaviti neki novi još napredniji strojevi. Razvojem industrije javlja se ideja za proizvodnju alatnog stroja koji kombinira više proizvodnih postupaka. Takvi strojevi nazivaju se hibridni alatni strojevi. Primjenom hibridnih procesa minimiziraju se potencijalni nedostaci pojedinih tehnologija. Kao rezultat dobiva se obrada materijala koji nije moguće obraditi nijednim pojedinačnim postupkom. Postiže se veća produktivnost i ekonomičnost, manje sile prilikom obrade, veća postojanost alata, poboljšani integritet površine itd. [1].

Novi materijali, kompoziti i legure, imaju odlična mehanička, kemijska i fizikalna svojstva. Takvi materijali omogućuju širi spektar u proizvodnji i kvalitetnije izratke, ali sa sobom nose problem obradivosti. Obradivost je osnovna tehnološka karakteristika materijala kojom se izražava njegova pogodnost za obradu, a procjenjuje se skupom kriterija obradivosti ili funkcija obradivosti [2]. Obrada tih materijala je skupa i proizvodnja nije ekonomična, stoga se razvijaju hibridni alatni strojevi koji će imati veće mogućnosti. Hibridnim alatnim strojevima postiže se efekt „1+1=3“, što nam govori da će obrada na hibridnom stroju imati više prednosti u odnosu na korištenje zasebnih tehnologija [3].

U ovom radu navest će se neki od brojnih hibridnih procesa i njihovi osnovni principi. Prikazat će se tipovi strojeva za hibridnu obradu i njihove karakteristike.

2. DEFINICIJA I PODJELA HIBRIDNIH PROCESA

Hibridni postupci obrade definirani su na više načina. *Aspinwall* ih 2001. godine opisuje kao kombinaciju postupaka koji se izvršavaju na jednom stroju. Također ih opisuje kao potpomognute postupke gdje su dva ili više postupka primijenjena simultano. *She* i *Hung* hibridne strojeve definiraju kao strojeve koji imaju mogućnost izvršavanja više različitih operacija na jednom mjestu, dok *Curtis* 2009. godine, govori kako je hibridna obrada ona gdje dva ili više postupka obrade odvajanjem materijala rade simultano [4].

Temeljeno na tim brojnim definicijama CIRP (College International Pour la Recherche en productique) iznosi definiciju da su hibridni postupci proizvodnje bazirani na simultanoj i kontroliranoj interakciji obradnih procesa i/ili izvora energije, koji imaju značajan utjecaj na poboljšane karakteristike procesa. Simultana i kontrolirana interakcija podrazumijeva sudjelovanje više procesa ili izvora energije u zoni obrade u isto vrijeme [1].

U tablici 1 prikazana je podjela hibridnih procesa. U početku procesi se dijele na: kombinaciju različitih izvora energije/alata i kontroliranu primjenu procesnih mehanizama. Prva grupa sadržava procese gdje su kombinirana dva ili više izvora energije/alata koji imaju sinergijski učinak u zoni obrade. Ti procesi se dalje dijele na potpomognute hibridne procese i kombinirane procese. Druga grupa sastoji se od više odvojenih procesa gdje se kombinacijom dolazi do obrade [1].

Tablica 1. Podjela hibridnih procesa [1]

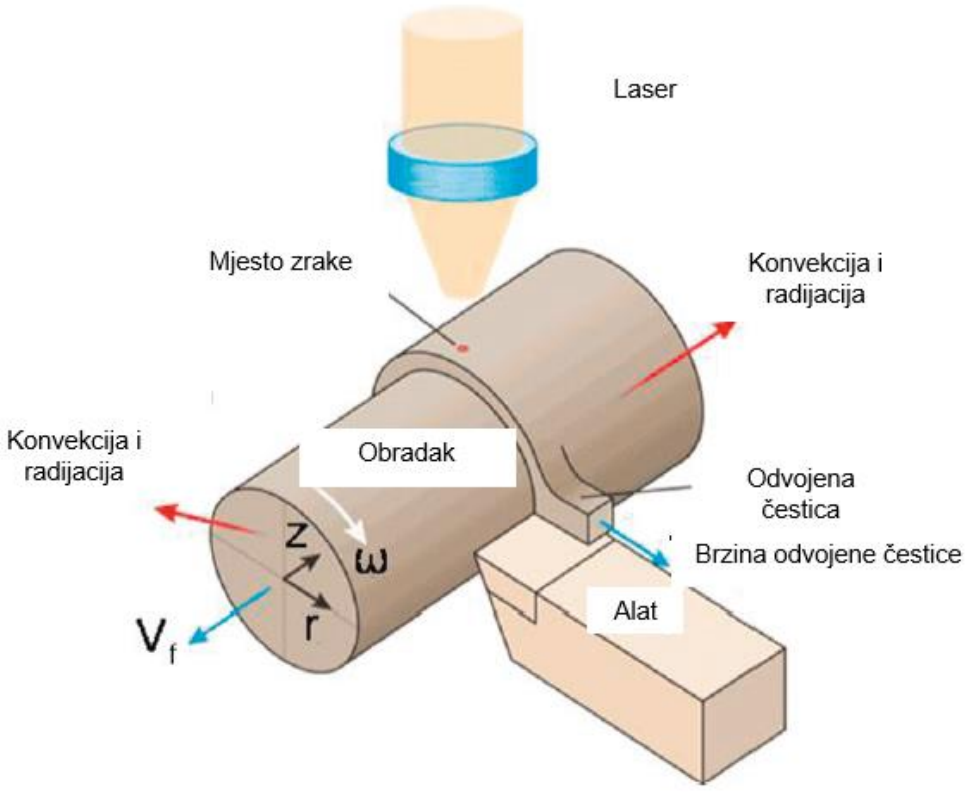
<table>
<tr><th colspan="3">HIBRIDNI PROCESI</th></tr>
<tr><td colspan="2">Kombinacija različitih izvora energije / alata</td><td rowspan="2">Kontrolirana primjena procesnih mehanizama</td></tr>
<tr><td>Potpomognuti hibridni procesi</td><td>Kombinirani (miješani) procesi</td></tr>
<tr><td>Obrada potpomognuta laserom
Obrada potpomognuta medijem
Obrada potpomognuta vibracijama</td><td>Kombinacija EDM/ECM
Zakrivljena ekstruzija profila
Kombinacija EDM i brušenja</td><td>Kombinacija obrade i oblikovanja
Lasersko oblaganje i glodanje</td></tr>
</table>

3. POTPOMOGNUTI HIBRIDNI PROCESI

U potpomognutim procesima definirani su primarni i sekundarni procesi. Primarni procesi su glavni procesi odnosno oni koji odvajaju materijal ili ga oblikuju, a sekundarni su oni koji pri tome asistiraju i omogućuju lakšu izvedbu primarnih procesa. Jedni od važnijih sekundarnih procesa su laser, vibracija i medij, a mogu se koristiti i magnetsko polje, abrazivi itd. [1].

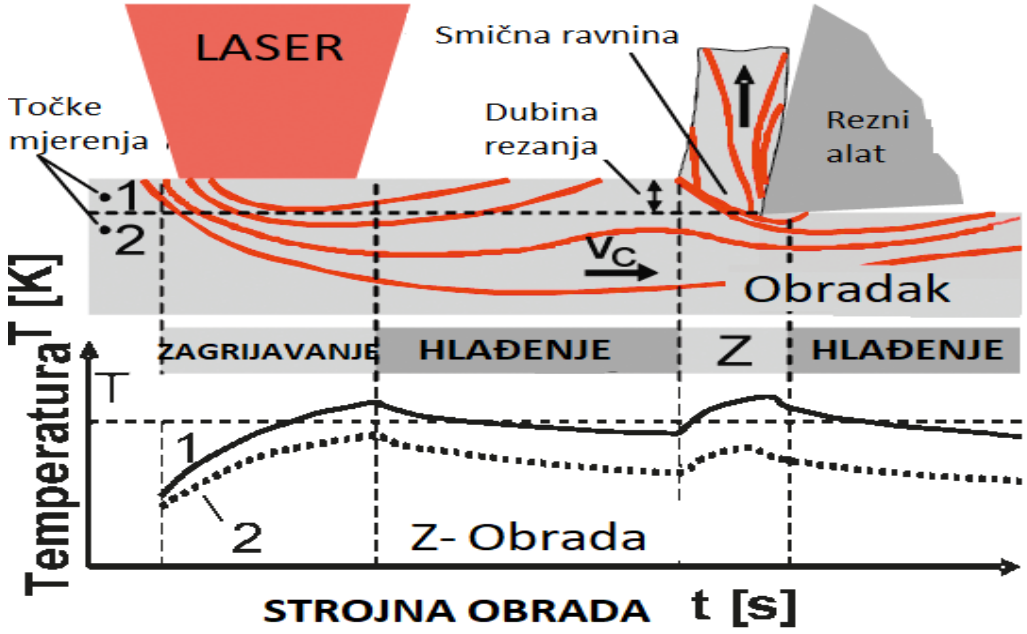
3.1 Obrada potpomognuta laserom

Laser se danas koristi u mnogim hibridnim obradama kao sekundarni proces, odnosno on asistira kod tokarenja, glodanja, oblikovanja ili bušenja. Prva implementacija lasera bila je u procesu tokarenja tvrdih materijala. Slika 1 prikazuje shemu procesa i položaj alata. Proces se odvija kao i uobičajeni konvencionalni postupak tokarenja, ali uz dodatak laserske zrake. Laserska zraka je fokusirana direktno ispred reznog alata. Zadatak zrake je zagrijavanje obratka u svrhu boljih karakteristika obrade. Pod utjecajem visoke temperature zrake materijal postaje mekši i lakše obradiv [1].



Slika 1. Laserom potpomognuto tokarenje [1]

Graf promjene temperature ovisno o vremenu obrade prikazan je na slici 2. Temperatura se mjerila na dva različita mjesta. Linija 1 na grafu prikazuje promjenu temperature mjerenu na manjoj dubini, na dubini koja se potom odvaja, a linija 2 prikazuje temperaturu obratka ispod debljine obrade. Na mjestu fokusa laserske zrake temperatura raste. Na površini se dobiva najviša temperatura, a porast s dubinom sve više pada. Nakon prestanka djelovanja laserske zrake, temperatura zagrijanog dijela se malo spušta prije nego što dođe do odvajanja materijala. U zoni obrade temperatura obratka naglo raste kod stvaranja odvojene čestice. Tu se postiže maksimalna temperatura u procesu. Nakon prolaska alata obradak se hladi i temperatura linearno pada.



Slika 2. Promjena temperature u obradi laserom [5]

Obrada potpomognuta laserom se može koristiti za obradu kaljenog čelika gdje dodatak topline omekšava veliku tvrdoću površinskog sloja materijala pa tijekom rezanja dolazi do duktilne umjesto krhke deformacije. Zaostala naprezanja postaju više vlačna (manje tlačna) i dubina prodiranja naprezanja postaje manja u odnosu na postupak konvencionalnog rezanja. Povećanje temperature daje blago poboljšanu hrapavost površine [5].

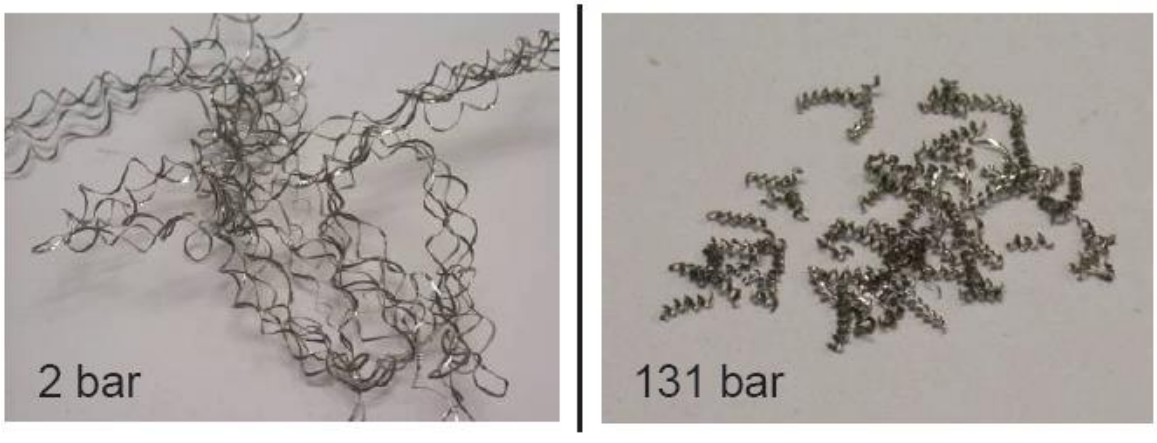
Glavne prednosti laserom potpomognute obrade prema [6] su:

- smanjenje sila rezanja i zagrijavanja alata tijekom obrade tvrdih materijala,
- poboljšana obradivost tvrdih i teško obradivih materijala pomoću lokalnog omekšavanja materijala laserom,
- smanjenje sila brušenja i povećanje kvalitete površine tijekom brušenja keramike,
- povećanje stope odvajanja materijala,
- povećavanje preciznosti u obradi vodenim mlazom.

3.2 Obrada potpomognuta medijem

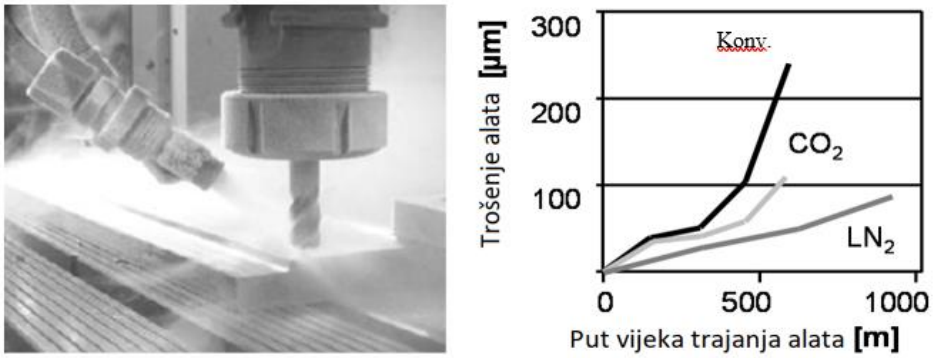
U obradi potpomognutoj medijem razni tipovi medija, kao voda, kemikalije, kriogeni fluidi, plinovi i metanol, primjenjuju se u zoni obrade kako bi poboljšali svojstva procesa. Kako bi olakšali odvajanje čestica kod tvrdih i teško obradivih materijala uobičajeno se primjenjuje fluid pod visokim tlakom usmjeren u zonu obrade. Tlak fluida je obično do 300 bar-a [6].

Proces se često primjenjuje za obradu titan i nikal legura, keramike te kompozitnih materijala. Brzina protoka i pritisak najvažniji su parametri fluida. Imaju značajan utjecaj na oblik odvojene čestice, smanjenje temperature, način trošenja alata te metaluršku strukturu obratka. Na slici 3 prikazana je usporedba oblika odvojene čestice nastalih pod različitim pritiskom fluida na primjeru obrade materijala Inocel 718. Uz korištenje fluida pod pritiskom od 2 bar-a dobiva se kontinuirana čestica koja je nepovoljna jer može oštetiti obradak ili alat. Povećanjem pritiska na 131 bar dobiva se povoljnija, nasječena odvojena čestica. Također, hlađenje pod visokim tlakom poboljšava integritet površine i omogućuje obradu s većim brzinama rezanja [5].



Slika 3. Usporedba odvojene čestice [5]

U obradu potpomognutom medijem pripada i kriogena obrada. U tom slučaju primjenjuju se fluidi na vrlo niskim temperaturama. Najčešće se koriste tekući dušik ili ugljični dioksid. Primjena kriogene obrade olakšava obradu materijala i značajno utječe na životni vijek alata. Slika 4 prikazuje postupak kriogene obrade i dijagram usporedbe trošenja alata tijekom konvencionalnog glodanja i kriogene obrade. Najmanje trošenje alata se postiže uz primjenu tekućeg dušika (LN_2). Uz prijeđeni put od 500 metara alat se potroši svega oko 40 μm. Primjenom ugljičnog dioksida za isti prijeđeni put alat bi se potrošio za oko 70 μm. U usporedbi s konvencionalnom obradom ostvaruje se znatno manje trošenje. U konvencionalnoj obradi, za zadani prijeđeni put, trošenje alata bilo bi oko 150 μm, što je 3 puta veće trošenje u odnosu na kriogenu obradu uz korištenje tekućeg dušika [1].



Slika 4. Kriogena obrada [1]

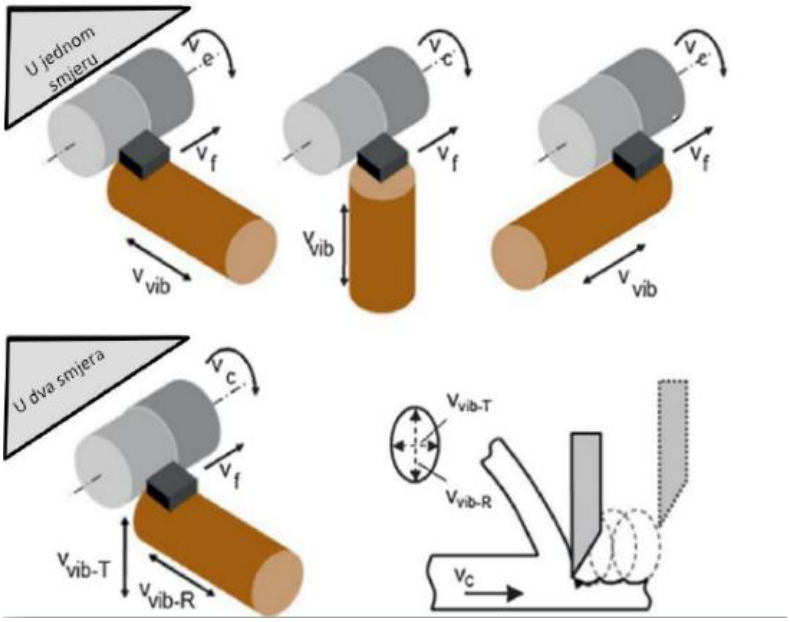
3.3 Obrada potpomognuta vibracijom

Proces obrade potpomognute vibracijama koristi vibracije za lakše odvajanje materijala i bolja svojstva procesa. U tom procesu vibracije su dodane alatu ili obratku. Vibracije su male, prosječne amplitude 1-15 μm, visoke frekvencije 10 – 80 kHz. U većini sustava vibracije su frekvencije od 18 do 25 kHz pa ih nazivamo ultrazvučne obrade. Generirane su pomoću piezometričkog elementa unutar držača alata ili vretena. Kod obrade čelika povećanjem frekvencija vibracija dobiva se bolja kvaliteta površine [5] [6].

Glavne prednosti ultrazvučne obrade su kraće vrijeme obrade i bolja kvaliteta površine, lakša obrada krhkih materijala kao staklo i keramika, manje sile rezanja, duži vijek trajanja alata te smanjena sklonost pojave srha. Rezultantna sila rezanja računa se prema izrazu (1) gdje je $\omega = 2 * \pi * f_{us}$ [5] [6].

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

U tokarenju potpomognutom vibracijama, vibracije se generiraju u jednom ili dva smjera. Ukoliko se upotrebljava dvosmjerno generiranje vibracija, dolazi do eliptičnog gibanja. Prikaz mogućih smjerova prikazan je na slici 5. Najčešći oblik generiranja vibracija je u smjeru rezanja [7].



Slika 5. Smjerovi vibracija [7]

Prema [8] postoje dva tipa obrade potpomognute ultrazvučnim vibracijama. Prvi tip su ultrazvučno potpomognute mehaničke obrade gdje se vibracije koriste za poboljšavanje konvencionalnih postupaka. Osim spomenutog ultrazvučnog tokarenja razvijeni su postupci ultrazvučnog brušenja, glodanja te bušenja. Drugi tip su ultrazvučno potpomognuti napredni postupci kao što su elektroerozija (EDM) i elektrokemijski postupak (ECM).

4. KOMBINIRANI PROCESI

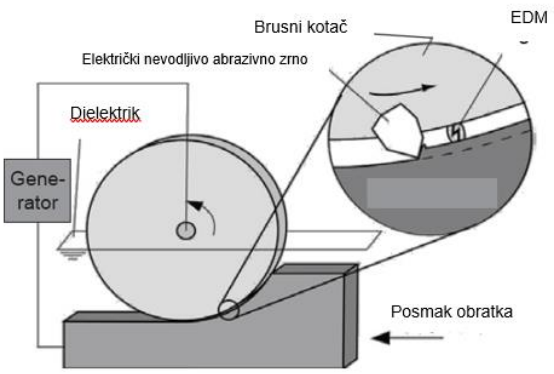
Kombinirani ili miješani procesi sastoje se od dva ili više procesa koji se odvijaju u isto vrijeme. Prema [1] u tu grupu spadaju različiti procesi odvajanja materijala te različiti procesi oblikovanja. Također postoje i kombinacije između procesa odvajanja i oblikovanja, ali se ti procesi manje koriste.

4.1 EDM i brušenje

Elektroerozijska obrada (EDM) spada u nekonvencionalne postupke obrade. Alat za obradu ne mora biti tvrđi od obratka jer praktički nema mehaničkih sila između alata i obratka. Na proizvodnost ne utječu mehanička svojstva obratka, ali utječu fizikalna (električna vodljivost, toplinska vodljivost…). Postoje dvije vrste procesa, elektroerozijska obrada žigom i elektroerozijska obrada žicom. Princip rada sastoji se u električnom pražnjenju (iskrenju) između elektroda, alata (katode) i obratka (anode), koji su priključeni na istosmjernu struju i uronjeni u dielektričnu tekućinu [8].

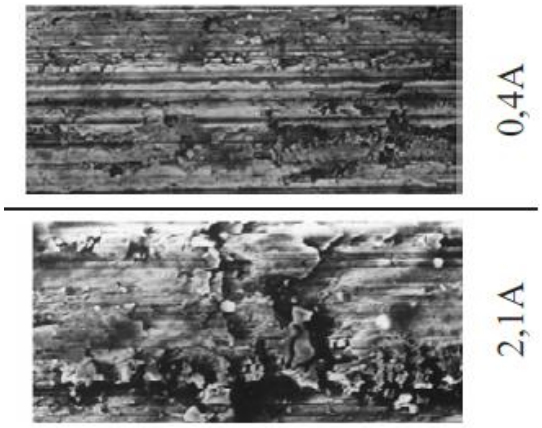
Brušenje je postupak obrade odvajanjem čestica alatom geometrijski nedefinirane oštrice. To je vrlo precizan postupak koji se upotrebljava za finu i pretežno završnu obradu ravnih, cilindričnih ili složenih oblika. Dijeli se na istosmjerno i protusmjerno te obodno i čeono. Izvodi se pretežno na brusilicama, a alat za brušenje naziva se brusni kotač koji se sastoji od brusnih zrna, veziva i šupljina ili pora [9].

Hibridni proces EDM i brušenja prikazan je na slici 6. Odvajanje materijala postignuto je sinergijski između erozije iskre i abrazije zrnima. Sustav se sastoji od brusnog kotača i obratka koji su spojeni na izvor struje te dielektrika. U prostoru između brusnog kotača i obratka dolazi do iskrenja uslijed pulsirajućeg djelovanja električne struje. Uslijed toga, materijal se tali i odvojene čestice se odvode strujanjem dielektrika koje proizvodi brusni disk svojom rotacijom [1].



Slika 6. EDM + brušenje [6]

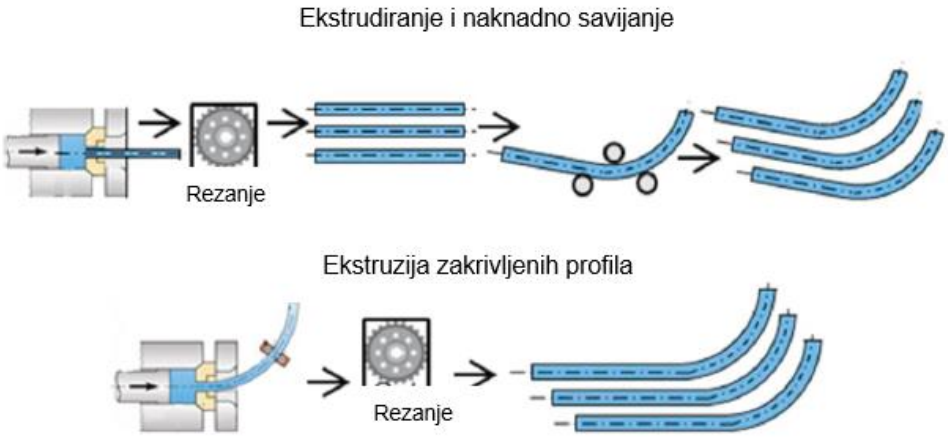
Tijekom EDM brušenja teško obradivih, ali električki vodljivih materijala, uz pomoć vezanih dijamantnih zrna na brusnom kotaču, performanse brušenja su poboljšane učinkovitim uklanjanjem materijala s obratka i čišćenjem površine brusnog kotača. Tekstura površine se mijenja ovisno o jačini struje u procesu. Povećanjem jakosti struje pada uloga procesa brušenja. Prilikom korištenja slabije struje utori napravljeni brušenjem jasno su vidljivi, a nakon povećanja struje to više nije slučaj, kao što prikazuje slika 7 [5].



Slika 7. Tekstura površine [5]

4.2 Ekstruzija i savijanje

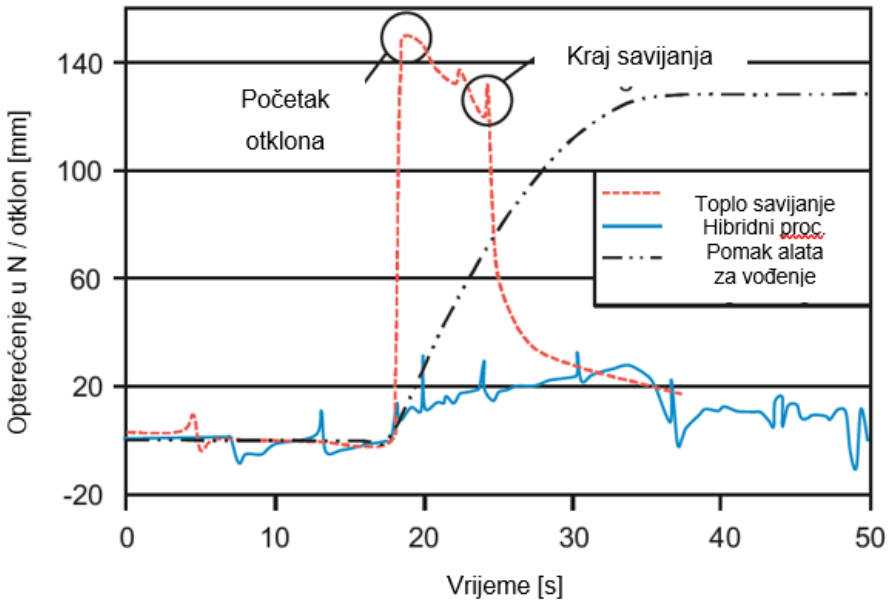
Kombinirani proces koji nastaje spajanjem dva procesa oblikovanja naziva se ekstruzija zakrivljenih profila. Za razliku od konvencionalnog procesa gdje se dva postupka izvode jedan nakon drugog, u ovom hibridnom procesu profil odmah nakon ekstrudiranja prolazi kroz alat za vođenje i savija se prema potrebnim mjerama. Alat za vođenje može se pomicati pomoću linearnog sustava te prilagoditi zahtjevima. Slika 8 prikazuje usporedbu konvencionalnog i hibridnog procesa. Konvencionalnim postupkom prvo se provodi proces ekstrudiranja, potom se režu profili na željene dimenzije i naknadno ih se novim procesom provlači kroz valjke kako bi se savinuli. Hibridni proces ekstruzije zakrivljenih profila savijanje obavlja neposredno nakon izlaska profila iz ekstrudera, a potom se savinuti profil, spreman za uporabu, reže prema zahtjevima [1].



Slika 8. Usporedba procesa [1]

Ekstruzija zakrivljenog profila je vrlo fleksibilan proces s obzirom na poprečni presjek profila. Mogu se izrađivati profili konstantnog ili promjenjivog poprečnog presjeka. U proizvodnji profila konstantnog poprečnog presjeka alat za vođenje je fiksiran na jednoj poziciji, dok se za proizvodnju profila varijabilnog poprečnog presjeka alat za vođenje pomiče sinkronizirano prema brzini gibanja profila.

Osim povećanja produktivnosti glavna prednost hibridnog procesa je smanjenje sila potrebnih za savijanje.



Slika 9. Sile u procesu [1]

Na slici 9 je graf koji prikazuje usporedbu promjene sile savijanja uslijed hibridnog procesa i zasebnog procesa savijanja koji slijedi nakon ekstruzije. Prema ovom primjeru grafa vidljivo je da savijanje počinje približno u 18. sekundi i u procesu naknadnog savijanja sila naglo raste. U prvom kontaktu profila i valjaka potrebna sila je najveća, a potom se tijekom savijanja smanjuje uz oscilacije. Maksimalna potrebna sila iznosi oko 150 N. Sile potrebne za savijanje u hibridnom postupku daleko su manje, maksimalna sila koja je potrebna da bi se ostvarilo savijanje iznosi približno 34 N.

5. KONTROLIRANA PRIMJENA PROCESNIH MEHANIZAMA

To je, uz kombinaciju više izvora energije, druga glavna skupina hibridnih procesa. Obrada se odvija kontroliranom kombinacijom efekata uzrokovanih pomoću više odvojenih procesa. Primjeri ovakvih obrada su brusno otvrdnjavanje, lasersko oblaganje u kombinaciji s glodanjem te ultrazvučna tehnologija [6].

5.1 Brusno otvrdnjavanje

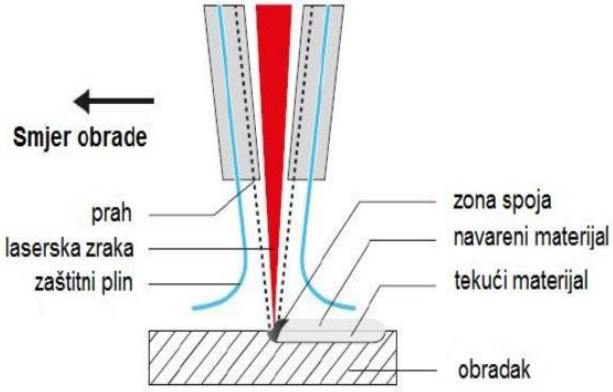
Brusno otvrdnjavanje je obradni proces koji se primjenjuje u završnoj obradi materijala. Toplinska obrada je završni korak mnogih procesa obrade. To je skupi proces koji zahtjeva puno uloženog vremena. Kako bi se taj proces ubrzao, predstavljeno je brusno otvrdnjavanje. Ideja je zamijeniti konvencionalni proces otvrdnjavanja s brusnim otvrdnjavanjem. Brusno otvrdnjavanje ima naprednu sposobnost za proizvodnju integriranog otvrdnutog sloja površine pomoću brušenja uz naknadnu završnu obradu u jednom stezanju obratka. U procesu brušenja, tijekom deformacija, klizanja i trenja, generira se velika količina topline u zoni kontakta između obratka i brusnog alata. Ta toplina može se iskoristiti za otvrdnjavanje površine obrađivanog dijela. Na taj način se štedi energija, smanjuje vrijeme obrade te povećava proizvodnost. Da bi se postigla potrebna veća toplina, brušenje se izvodi s manjom posmičnom brzinom i većom dubinom rezanja [6].

5.2 Lasersko oblaganje i glodanje

Drugi primjer hibridnog procesa kombinacije dvaju postupka je aditivni postupak laserskog oblaganja i postupak obrade odvajanjem čestica – glodanje. Najčešće služi za doradu i popravak skupih dijelova na jednom alatnom stroju. Aditivna tehnologija služi za dodavanje oštećenog materijala koji se potom u istom stezanju obradi glodanjem kako bi se postigao konačni oblik i kvaliteta površine izratka.

5.2.1 Lasersko oblaganje

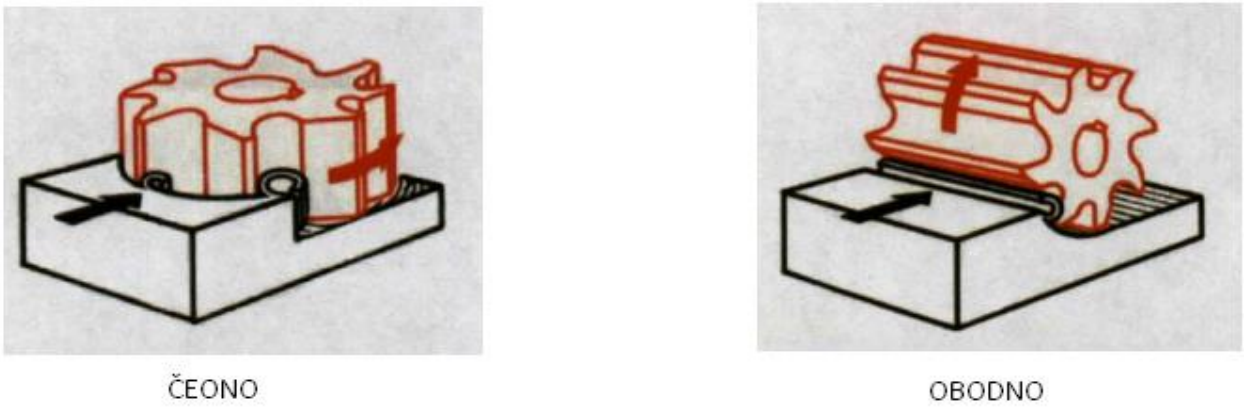
Lasersko oblaganje je jedan od postupaka aditivne tehnologije. Aditivna tehnologija se pojavljuje 1980-ih godina. Temelji se na dodavanju čestica materijala sloj po sloj sve dok se ne izgradi cijeli proizvod. Laserska zraka tali metalni prah koji se dobavlja pomoću mlaznice i tako ga navaruje na postojeći materijal obratka (slika 10). Postupak omogućuje izradu sitnih i kompliciranih dijelova koje nije moguće izraditi dotad poznatim klasičnim postupcima. Postupak se zasniva na relativno kratkoj interakciji laserske zrake i čestica praha (zračenje na česticu ne traje duže od 0,5 do 25 ms) [11].



Slika 10. Lasersko oblaganje [7]

5.2.2 Glodanje

Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica koji odvaja materijal i tako dodaje vrijednost proizvodu. Pripada u skupinu postupaka obrade zasnovanih na upotrebi alata s oštricom. Rezni alat je glodalo i ima geometrijski definiranu oštricu. Glodalo uvijek obavlja glavno gibanje i ono je kružno. Posmično i dostavno gibanje obično su pridruženi obratku. Postoji više vrsta glodanja. Dijeli se na obodno i čeono kao što je prikazano na slici 11 [12, 13].



Slika 11. Obodno glodanje [14]

5.2.3 Hibridni strojevi

Razlozi uporabe hibridnih strojeva umjesto pojedinačnih su višestruki. Njihovim korištenjem eliminiraju se neki nedostaci pojedinačnih procesa, povećava se brzina i proizvodnost te smanjuje mogućnost pogreške. Jedna od grešaka može se dogoditi prilikom stezanja obratka, jer za dvije zasebne obrade na dva različita alatna stroja,

trebalo bi imati barem dva stezanja obratka. Korištenjem hibridnog alatnog stroja dovoljno je jedno stezanje i time se direktno smanjuje mogućnost pogreške stezanja. U ovom radu prikazat će se karakteristike više hibridnih strojeva za lasersko oblaganje i glodanje. Glavni predstavnik je Lasertec serija hibridnih strojeva tvrtke DMG MORI. Mogu obrađivati razne materijale poput nehrđajućeg i alatnog čelika, legure aluminija, bronce i nikla, volfram karbide, plemenite metale te kobalt-krom-molibden legure.

5.2.3.1 Lasertec 65 DED hybrid

Lasertec 65 DED hybrid, prikazan na slici 12, proizveo je jedan od najvećih njemačkih proizvođača alatnih strojeva DMG MORI. Stroj pokreće motor snage 19 kW. Maksimalna brzina vrtnje alata odnosno glavnog vretena je 20000 min^{-1}, a uobičajeno se koristi na 14000 min^{-1} [16].



Slika 12. Lasertec 65 DED hybrid [16]

To je 5-osni hibridni alatni stroj ukupne površine manje od 12 m^2. U smjeru X osi nudi mogućnost pomaka 735 mm, Y os 650 mm te Z os 560 mm. Okretno nagibni stol je promjera 650 mm i može primiti obradak mase do 600 kg. Maksimalna visina obratka je 400 mm.

Na slici 13 prikazan je dio obrade laserskim oblaganjem te obrada glodalom.



Slika 13. Lasertec obrada [16]

Stroj je opremljen diodnim laserom snage 2500 / 3000 W. Laserska glava je integrirana pomoću HSK-A63 sučelja i njome se upravlja potpuno automatski, bez ikakve ručne intervencije. Nakon što je aditivni postupak završen, laserska glava se pomiče izvan radnog prostora kako bi se postupak glodanja mogao neometano odvijati i kako bi se laserska glava zaštitila od odvojene čestice. Strojem upravlja softverski paket Siemens NX. Jedan softverski paket koji upravlja cijelim proizvodnim lancem – konstrukcijom, aditivnim postupkom te postupkom obrade odvajanjem čestica. Omogućuje 3D simulacije i provjere kolizija. Primjeri proizvoda, kućište turbine i kalup za injekcijsko prešanje, napravljenih na predstavljenom stroju, prikazani su na slici 14 [15, 16].



Slika 14. Izradak - Lasertec 65 DED hybrid [16]

5.2.3.2 Lasertec 125 DED hybrid

Sljedeći stroj Lasertec serije, prikazan na slici 15, je većih dimenzija i kapaciteta. Sadrži okretno nagibni stol promjera 1250 mm koji može izdržati masu od 2000 kg. Ima pet osi, translacijske X, Y, Z i dvije osi koji pripadaju obratku. U smjeru X osi pomak je moguć za 1335 mm, Y osi 1250 mm i Z osi za 900 mm. Os okretno nagibnog stola može se naginjati za $\pm$120°. Postolje je konstruirano s uporištem u 3 točke [17].



Slika 15. Lasertec 125 DED hybrid [18]

Sadrži dva spremnika za pohranu različitih materijala metalnog praha koji se tale uz pomoć diodne laserske zrake snage 2500 / 3000 W. Omogućena je automatska kalibracija praha te senzor brzine dobave istog. Stroj ima mogućnost automatske izmjene alata. Standardna izvedba posjeduje magazin od 30 alata, a u prilagođenoj izvedbi ih može biti 60. Ovaj hibridni stroj je opremljen integriranom termalnom kamerom koja nadzire cijeli radni prostor. Omogućeno je selektivno dodavanje materijala tvrdoće veće od 60 HRC te zahvaljujući tome procesi toplinske obrade nisu nužni. Koristi prevučene alate što im produljuje vijek trajanja i poboljšava svojstva. Mogu se obrađivati mnogi materijali, tvrdi, mekani, magnetični, nemagnetični, a primjer tijela ventila i kalupa za oblikovanje izrađenih na stroju prikazani su na slici 16 [18].



Slika 16. Izradci - Lasertec 125 DED hybrid [17]

5.2.3.3 Lasertec 4300 DED hybrid

Lasertec 4300 DED hybrid [19], prikazan je na slici 17. Glavno vreteno pokreće motor snage 30 kW, brzinom vrtnje do 3000 min^{-1}. Uz glavno, može imati još jedno dodatno vreteno. Može primiti obradke do 1700 kg , a zauzima površinu od 63 m^2.



Slika 17. Lasertec 4300 DED hybrid [19]

Riječ je o hibridnom alatnom stroju koji uz aditivnu tehnologiju i glodanje ima mogućnost tokarenja obradaka. Obradak koji se tokari može biti maksimalne dužine od 1518 mm i promjera 660 mm. Primjer obratka koji se izrađuje na tom stroju je mlaznica rakete prikazana na slici 18. Pomak stroja po X osi je 660 mm, po Y osi 400 mm i po Z osi 1500 mm. Standardna izvedba ima magazin od 20 alata, a maksimalni mogući kapacitet spremišta za automatsku izmjenu je 100 alata.



Slika 18. Obrada mlaznice rakete [19]

Nudi mogućnost obrade metalnih i reaktivnih materijala (npr. Ti-6Al-4V). Svi procesi se nadgledaju kako bi se postigao najviši stupanj sigurnosti i kvalitete. Proces obrade

laserom praćen je mnogim senzorima i kontinuirano se nadzire kako bi se snaga lasera automatski regulirala. Koristi se diodni laser snage 3000 W. Dijelovi stroja posjeduju unutarnje kanale koji omogućuju novi poboljšani oblik hlađenja.

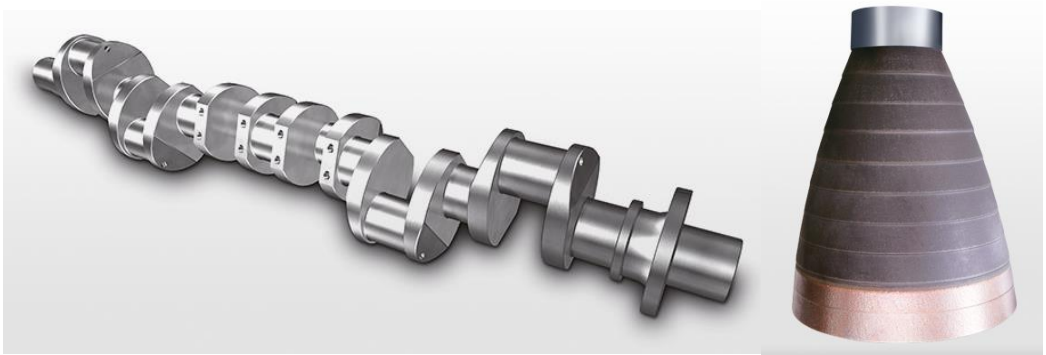
5.2.3.4 Lasertec 6600 DED hybrid

Slika 19 prikazuje jedan od najvećih Lasertec strojeva. Posjeduje veliki radni prostor i može primiti obradak maksimalnog promjera ∅1010 mm i dužine 3702 mm. Prema [20], translacijski pomak po X osi je 1040 mm, Y os ima raspon od 610 mm i Z os 3890 mm.



Slika 19. Lasertec 6600 DED hybrid [21]

Posjeduje dva vretena koja pokreću motori snage 45 kW brzinom vrtnje do 1000 min^{-1}. Vretena rade sinkronizirano i omogućuju prijenos obratka s jednog vretena na drugi kako bi se lakše i uspješnije izveo proces aditivne tehnologije. Stroj ima ugrađeni pokretni kanal za skupljanje prašine koji onemogućuje nepoželjno raspršivanje čestica prašine. Vrata radnog prostora opremljena su posebnim senzorima koji isključuju lasere prije prolaska zrake izvan stroja i tako osiguravaju još viši stupanj sigurnosti. Zbog velikog radnog prostora stroj je pogodan za primjenu u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji te industriji nafte i plina. Slika 20 prikazuje koljenasto vratilo i mlaznicu rakete napravljene na predstavljenom stroju [20, 21].



Slika 20. Izradci - Lasertec 6600 [20]

5.2.3.5 Integrex i-400 AM

Osim predstavljenih strojeva proizvođača DMG MORI, američka tvrtka Mazak također se bavi proizvodnjom hibridnih alatnih strojeva koji aditivnu tehnologiju i obradu odvajanjem čestica primjenjuju na jednom stroju. Integrex i-400 AM je prikazan na slici 21, a to je stroj koji omogućuje obradu prizmatičnih i okruglih obradaka korištenjem aditivne tehnologije [22].



Slika 21. Integrex i-400AM [22]

Stroj koristi lasersku zraku kako bi rastalio metalni prah i tako sloj po sloj gradi obradak. Nakon toga, na istom alatnom stroju, postupkom obrade odvajanjem česticama se dolazi do konačnog zadanog oblika i određene kvalitete površine. Može spajati različite vrste metalnih materijala pa je pogodan za doradu i popravak oštećenih dijelova. Stroj ima implementiranu automatsku izmjenu alata i postoje dvije različite mlaznice za aditivnu tehnologiju, jedna za finu obradu i jedna za visokobrzinsku (slika 22). Fina mlaznica omogućuje koaksijalno lasersko oblaganje visoke točnosti sa zrncima manje veličine, a visokobrzinska omogućuje oblaganje većom brzinom, većom veličinom zrnca i s većim učinkom taloženja [22, 23].



Slika 22. Tipovi mlaznice [22]

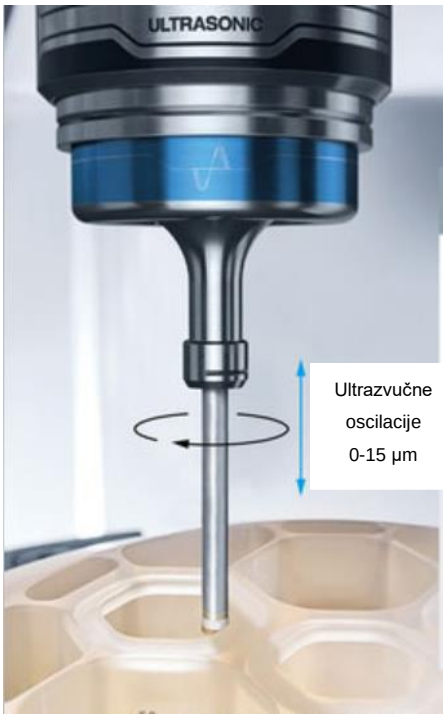
Integrex i-400 AM ima 5 osi. Translacijske osi X, Y, Z, te osi B (od -30°do +120°) i C (360°) vretena. Posjeduje i dodatno vreteno kako bi se postigla veća produktivnost. Ova hibridna tehnologija koristi se za maloserijsku proizvodnju teško obradivih materijala. Primjenjuje se u zrakoplovnoj i energetskoj industriji te u medicini za razna pomagala i uređaje. Na slici 23 prikazana je obrada strojem. Lijevi dio slike prikazuje lasersko oblaganje, a desni dio obradu odvajanjem čestica glodanjem dijela koji je prethodno napravljen aditivnom tehnologijom [22, 23].



Slika 23. Obrada Integrex i-400 AM [22]

5.3 Hibridna ultrazvučna tehnologija

Zahtjevi kupaca razlikuju se ovisno o određenoj industriji. Za neke industrije je vrlo važna kvaliteta obrađene površine, za neke kvaliteta materijala itd. Međutim, kraće vrijeme obrade i veća produktivnost cilj su svake proizvodne kompanije. Upravo po tom pitanju ultrazvučna tehnologija tvrtke DMG MORI bilježi odlične rezultate. U odnosu na same konvencionalne postupke, primjena ultrazvučne tehnologije uvelike povećava produktivnost. Hibridna ultrazvučna tehnologija temelji se na istovremenoj primjeni obrade odvajanjem čestica i ultrazvučne vibracije alata ili obratka. Primarno gibanje alata je rotacijsko uz dodatak oscilacija u aksijalnom smjeru (slika 24). Oscilacije u aksijalnom smjeru se kreću od 0 do 15 μm. Koriste se HSK držači alata visokih amplituda [24, 25].



Slika 24. Ultrazvučne oscilacije [24]

Uz pomoć vibracija, sile rezanja u procesu znatno se smanjuju. Na račun toga, mogu se povećati posmaci prilikom obrade, a posljedica je bolja kvaliteta površine i smanjit će se trošenje alata i broj i dubina mikro pukotina u tvrdim i krhkim materijalima. Dodatak ultrazvučnih vibracija omogućuje ekonomičnu obradu (brušenje, glodanje, bušenje) teško obradivih materijala, keramike, stakla, volfram karbida i kompozita. Također, mogu se obrađivati dijelovi kompleksne geometrije. Zahvaljujući vibracijama, moguće je bušiti mikro provrte promjera većeg od 0,1 mm [25].

5.3.1 Ultrazvučni strojevi

Tvrtka DMG MORI ima široki spektar strojeva. Uz dosad predstavljene hibridne strojeve za lasersko oblaganje i glodanje, tvrtka proizvodi i hibridne ultrazvučne strojeve. U ovom poglavlju prikazat će se njihove karakteristike. Strojevi su podijeljeni u četiri serije: linear, monoBLOCK, eVo, portal i mobileBLOCK. Sa svim strojevima upravlja moćni kontrolni sustav CELOS koji sadrži brojne dodatne aplikacije za lakše upravljanje [26].

5.3.1.1 Ultrasonic 20 linear

Na slici 25 prikazan je Ultrasonic 20 linear koji je 5-osni, potpuno digitalno upravljani, hibridni ultrazvučni alatni stroj. Prema [27, 28], to je jedan od preciznih hibridnih strojeva koji postiže brzinu vrtnje od 60000 min^{-1}. Pokreće ga motor snage 15 kW. Stroj je veoma kompaktan, zauzima površinu od svega 3,5 m^2.



Slika 25. Ultrasonic 20 linear [27]

Maksimalni pomaci po osima su 200 mm za X os, 220 mm za Y te 280 mm za Z os, a maksimalni brzi hod po svim osima je 40 m/min. Ultrazvučne frekvencije su raspona 15-55 kHz, dok je maksimalna amplituda 10 µm**.** Posjeduje okretno nagibni stol, a nagibni kut se može gibati od -15 do 130°**.** Promjer stola je 250 mm i može primiti masu do 15 kg. Ima automatsko prepoznavanje frekvencija, prilagodbu, regulaciju amplitude te automatsko podešavanje posmaka. Posjeduje automatsku izmjenu obradaka i može rukovati s 99 komada od skladišta do radne jedinice. Izmjena obradaka traje do 30 sekundi. Također vrši automatsku izmjenu alata i uobičajeno ima spremnik koji sadrži 24 alata, a maksimalno ih može imati 60. Sile uslijed procesa su smanjene do 50% što omogućuje uporabu većih posmaka, bolju kvalitetu površine (Ra < 0,1 µm).

Stroj je namijenjen za obratke manjih dimenzija. Može obrađivati teško obradive materijale kao što su nikal i titan legure, magnezij, volfram te kompozitne materijale. Na slici 26 prikazan je primjer izratka napravljen na opisanom stroju.



Slika 26. Izradak Ultrasonic 20 linear [27]

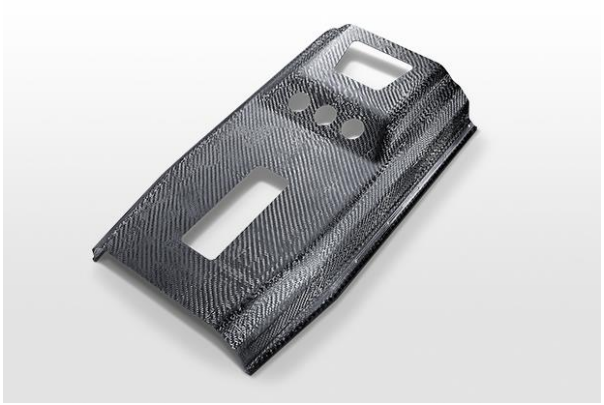
5.3.1.2 Ultrasonic 50

Prema [29], Ultrasonic 50 jedan je od strojeva koji pripada seriji monoBLOCK. Cijela serija posjeduje velika vrata što omogućuje jedinstveni pristup radnom prostoru. To je najmanji stroj koji pripada navedenoj seriji, a prikazuje ga slika 27.



Slika 27. Ultrasonic 50 [29]

Po X osi omogućuje gibanje od 650 mm, po Y osi 520 mm i po Z osi 475 mm maksimalnom brzinom praznog hoda od 42 m/min. Maksimalna visina radnog komada može biti 350 mm. Ima stol promjera 630 mm, a maksimalno opterećenje stola ograničeno je na 300 kg. Stol je okretno nagibni i ima mogućnost nagibanja $\pm 110°$ što omogućuje veliku fleksibilnost. Hlađeni ležajevi stola omogućuju veliku preciznost. Tehnologija je integrirana pomoću HSK-A63 aktuatorskog sustava. Kao i Ultrasonic 20 linear omogućava smanjenje sila do 50% i time omogućava obradu većim posmacima uz manje trošenje alata. Ima odličnu preglednost i dostupnost alata. Standardna verzija posjeduje magazin od 30 alata, a moguće su izvedbe sa 60 ili 120 mjesta. Maksimalna brzina vrtnje je 20000 min^{-1}, a stroj pokreće motor od 16 kW. Mogućnosti stroja su velike, a slika 28 prikazuje primjer izradka.



Slika 28. Izradak - Ultrasonic 50 [29]

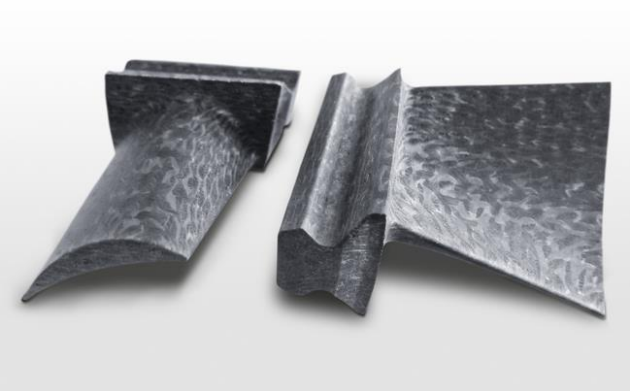
5.3.1.3 Ultrasonic 65

Prema [30], srednji po veličini u monoBLOCK seriji je Ultrasonic 65, slika 29. Stroj je površine 8 m^2 te ima veliki otvor vrata od 1,31 m što omogućuje lagan pristup radnom području.



Slika 29. Ultrasonic 65 [30]

Radno područje u smjeru X osi je 735 mm, Y osi 650 mm i Z osi 560 mm. Obradak može biti maksimalne visine 500 mm. Tehnologija je integrirana kroz HSK-A63 / HSK-E50 aktuatorski sustav. Standardna brzina vrtnje mu je 15000 min^{-1}, dok maksimalna doseže vrijednost od 24000 min^{-1}. Motor koji pogoni stroj je snage 21 kW. Standardno posjeduje magazin od 30 alata, a ima ih mogućnost primiti čak 160. Sadrži okretno nagibni stol promjera 650 mm koji podržava masu obratka do 600 kg. Primjer lopatica izrađenih na stroju prikazan je na slici 30.



Slika 30. Izradak - Ultrasonic 65 [30]

5.3.1.4 Ultrasonic 85

Ultrasonic 85 posljednji je stroj koji pripada monoBLOCK seriji. Iako je najveći od njih, slika 31, zauzima površinu od samo 12 m^2.



Slika 31. Ultrasonic 85 [31]

Omogućuje gibanje X osi u rasponu od 935 mm, Y osi 850 mm te Z osi 650 mm. Visina obratka je ograničena na 590 mm. Okretno nagibni stol može prihvatiti obratke mase do 1000 kg, a njegov promjer je 850 mm. Tehnologija je integrirana uz HSK-A63 / HSK-A100 / HSK-E50 aktuatorski sustav. Sile su također smanjene do 50% što nam omogućuje pogodnosti nabrojane kod prethodnih strojeva. Posjeduje veliki otvor vrata od 1,5 m. Kao i Ultrasonic 65, maksimalna brzina vrtnje je 24000 min^{-1}, a snaga motora 21 kW. U standardnoj izvedbi sadrži magazin od 30 alata, a maksimalni kapacitet iznosi 160 alata. Slika 32 prikazuje primjer kućišta kamere napravljenog na stroju [31].



Slika 32. Izradak - Ultrasonic 85 [31]

5.3.1.5 Ultrasonic 40 eVo linear

Prema [32], ultrazvučni obradni centri eVo serije omogućuju 5-osnu simultanu obradu tokarenja i glodanja. Optimizirana portalna konstrukcija omogućuje najveću krutost, zahtjeva malu površinu prostora i ima odlični pristup radnom području.



Slika 33. Ultrasonic 40 eVo linear [32]

Slika 33 prikazuje Ultrasonic 40 eVo linear koji je vrlo dinamičan i ima mogućnost brzog hoda X, Y i Z osi u iznosu od 80 m/min. Mogući hodovi po X i Y osi su 400 mm, a po Z osi 375 mm. Maksimalna visina obratka je 275 mm. Druge dvije osi pridružene su obratku. Nagib stola, B os, može varirati od -5° do +110° dok se rotacijska C os okreće za 360° maksimalnom brzinom vrtnje od 1200 min^{-1}. Vreteno pogoni motor snage 14 kW. Standardna brzina vrtnje je 14000 min^{-1}, a maksimalna moguća 24000 min^{-1}. Ima magazin od 30 alata. Prihvatni stol je promjera 400 mm i posjeduje hlađene ležajeve. Može prihvatiti obradak od maksimalno 250 kg.

Primjer izrađenog diska kočnica prikazuje Slika 34.



Slika 34. Izradak - Ultrasonic 40 eVo linear [32]

5.3.1.6 Ultrasonic 210 P

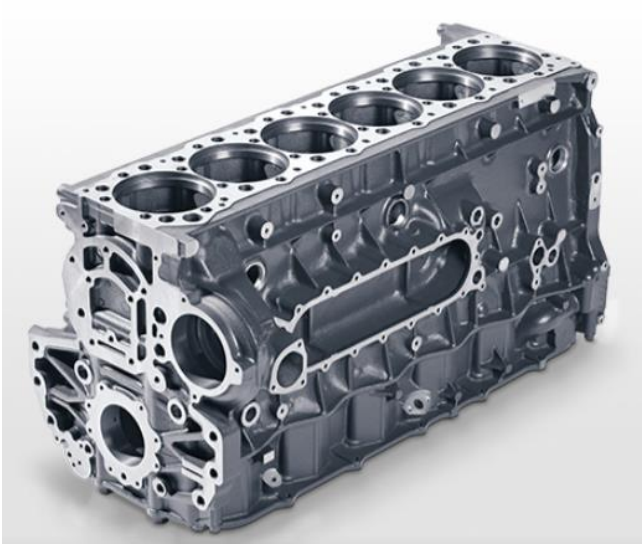
Skupinu najvećih ultrazvučnih DMG MORI alatnih strojeva [33, 34], predstavljaju portalni strojevi. Oni omogućuju maksimalnu točnost za niz operacija jer je krutost stroja i za maksimalni kapacitet rezanja velika. Ultrasonic 210 P, prikazan na slici 35, namijenjen je za velike obratke. Ima prihvatni stol promjera 1700 mm i može primiti obratke mase do 8000 kg.



Slika 35. Ultrasonic 210 P [33]

Brzi hod X, Y, Z osi ograničen je s 30 m/min. U smjeru X i Y osi dužina iznosi 2100 mm, a u smjeru Z osi 1250 mm. Maksimalna visina komada iznosi 1000 mm. Unatoč svojim dimenzijama, zahvaljujući inteligentnim agregatima, potrošnja energije je niska. Pokreće ga motor snage 52 kW, a standardna brzina vrtnje vretena je 12000 min^{-1}. Maksimalna brzina iznosi 30000 min^{-1}. Omogućuje posmičnu brzinu od 60 m/min i visoku preciznost stroja od 8 µm. Dugoročna visoka točnost zagarantirana je zahvaljujući hlađenim

linearnim vodilicama i aktivnoj kontroli vretena. Tehnologija je integrirana pomoću HSK-A63 / HSK-A100 / HSK-E50 aktuatorskog sustava. Slika 36 prikazuje blok motora napravljen na opisanom stroju.



Slika 36. Izradak Ultrasonic 210 P [33]

5.3.1.7 Ultrasonic mobileBLOCK

Prema [7, 35], jedan od glavnih problema popravka oštećenih dijelova je to što je proizvod van uporabe jedno vrijeme i ne može obavljati ulogu za koju je namijenjen. Ukoliko se radi o nekom stroju iz proizvodne linije, cijeli proces se mora zaustaviti dok se stroj ne reparira, a to predstavlja velike gubitke. Isto tako ako se radi o popravku nekog velikog proizvoda, primjerice aviona, potrebno je osigurati veliki prostor za rad. Kako bi se takvi problemi izbjegli i proces popravka olakšao tvrtka DMG MORI proizvela je pokretnu 5-osnu ultrazvučnu obradnu jedinku koju prikazuje slika 37.



Slika 37. Ultrasonic mobileBLOCK [7]

Uz pomoć pokretnog stroja popravak je moguć na bilo kojem mjestu u značajno kraćem vremenu s velikom preciznošću i kvalitetom. Ima ugrađeni okretno nagibni stol pomičan za $\pm 95°$. Konstrukcija stroja je lagana i iznosi oko 85 kg. Stroj je kompaktan, dimenzija $1300 * 1300 * 1000$ mm. Maksimalna brzina vrtnje glavnog vretena iznosi 35000 min^{-1}. Sadrži posebno dizajnirani vakuumski sustav nožica koji omogućuje laganu prilagodbu na oštećeni dio. Standardna izvedba posjeduje 12 nožica, a moguće su izvedbe i sa 16 komada. Upravljanje je potpuno digitalno i prilagođeno korisniku. Sadrži laserski sustav za pronalaženje oštećenja i skeniranje površine. Najčešće se primjenjuje u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, u brodogradnji te za energetski sektor. Slika 38 prikazuje mobileBLOCK u pogonu tijekom obrade oštećenog dijela aviona.



Slika 38. Ultrasonic mobileBLOCK u obradi [35]

6. ZAKLJUČAK

Današnje doba donosi velike promjene i napretke u tehnologiji. U svakom novom desetljeću, pa čak i godini, moguće je vidjeti nove izume te poboljšavanje kvalitete i brzine onih starih. Isto tako, zahtjevi za brzom i efikasnom proizvodnjom postaju sve veći. Upravo zbog toga nužno je prilagoditi i alatne strojeve kako bi se pomoću njih ti zahtjevi mogli čim lakše i čim više pratiti te ostvarivati.

Hibridni strojevi su numerički upravljani alatni strojevi koji obavljaju dvije različite tehnologije na jednom suvremenom i skupom stroju. Korištenjem jednog hibridnog alatnog stroja moguće je eliminirati neke nedostatke koji bi se pojavili prilikom korištenja dva odvojena stroja. Pogodni su jer pružaju veće mogućnosti. Izvođenje više tehnologija na jednom stroju omogućava bržu proizvodnju, bolju kvalitetu površine te precizan rad.

Jedan od najvećih proizvođača hibridnih alatnih strojeva je tvrtka DMG MORI koja se između ostalog bavi proizvodnjom ultrazvučnih hibridnih strojeva i strojeva za lasersko oblaganje i glodanje. Takvi strojevi pomažu u reparaciji dijelova bez njihove ponovne cjelokupne proizvodnje. Posjeduju veliki radni prostor i otvor vrata koji omogućuju lakše nadziranje procesa. Svi strojevi su potpuno digitalizirani te iziskuju visokoobrazovane inženjere za implementaciju takvih sustava.

U budućnosti je moguće očekivati još veće i strože zahtjeve konkurentnog tržišta, ali i još naprednije alatne strojeve, koji će to pratiti. Moguće je pretpostaviti da će se proizvoditi još napredniji hibridni alatni strojevi s većom kombinacijom procesa.

LITERATURA

[1] Lauwers, B., Klocke, F., Klink, A., Erman Tekkaya, A., Neugebauer, R., Mcintosh, D.: *Hybrid processes in manufacturing*, CIRP Annals 63 (2014), 561-583.

[2] https://eucenje.fsb.hr/pluginfile.php/65531/mod_resource/content/1/8.%20i%209._predavanje_obradivost_odredjivanje_parametara.pdf (pristupljeno 8.12.2020.)

[3] http://home.iitk.ac.in/~jrkumar/download/Chapter%202%20-%20Overview%20of%20Hybrid%20Machining%20processes.pdf (pristupljeno 8.12.2020.)

[4] Bhowmik, S., Zindani, D.: *Hybrid Micro-Machining Processes,* SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, Cham, 2019.

[5] Lauwersa, B.: *Surface Integrity in Hybrid Machining Processes*, Procedia Engineering 19 (2011), 241–251.

[6] Krishna, K. S., Bellotti, M., Qian, J., Reynaerts, D., Lauwers, B., Luo, X.: Overview of Hybrid Machining Processes*, Hybrid Machining Theory Methods and Case Studies,* Academic Press, London, 2018.

[7] Ciglar, D.: Hibridni alatni strojevi, hibridna proizvodnja, hibridni procesi, FSB, Zagreb, 2021.

[8] https://www.fsb.unizg.hr /kas/ODIOO/Nekonvencionalne (pristupljeno 9.12.2020.)

[9] http://titan.fsb.hr/~mklaic/ODOO_dio_obrada_odvajanjem/Predavanja/10.PREDAVANJE_ODIOO-w2.pdf (pristupljeno 9.12.2020.)

[10] Gupta, K., Jain, N. K., Laubscher, R. F.: *Hybrid Machining Processes (Perspectives on Machining and Finishing)*, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, Cham, 2016.

[11] Godec, D., Šercer, M.: *Aditivna proizvodnja*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2015.

[12] Šavar, Š.: *Obrada odvajanjem čestica 1. dio,* Liber, Zagreb, 1977.

[13] Šavar, Š.: *Obrada odvajanjem čestica 2. dio,* Liber, Zagreb, 1978.

[14] https://www.fsb.unizg.hr/kas/ODIOO/Uvod%20u%20OOC%20ooc.pdf (pristupljeno 12.12.2020.)

[15] https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/244423/pl0uk13-lasertec-series-pdf-data.pdf (pristupljeno 12.12.2020.)

[16] https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-65-ded-hybrid (pristupljeno 15.12.2020.)

[17] https://en.dmgmori.com/resource/blob/396772/c9877c2ed13d4535124c09aada07dd55/pl1uk-lasertec-125-3d-hybrid-pdf-data.pdf (pristupljeno 15.12.2020.)

[18] https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-125-ded-hybrid (pristupljeno 15.12.2020.)

[19] https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-4300-ded-hybrid (pristupljeno 18.12.2020.)

[20] https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-6600-ded-hybrid (pristupljeno 18.12.2020.)

[21] http://www.made-in-europe.nu/2020/08/dmg-mori-lasertec-6600-3d-hybrid-groot-formaat-am-hybridemachine/ (pristupljeno 18.12.2020.)

[22] https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400am/

(pristupljeno 23.12.2020.)

[23] http://www.quality.unze.ba/zbornici/QUALITY%202019/021-Q19-026.pdf

(pristupljeno 23.12.2020.)

[24] https://media.dmgmori.com/media/epaper/technology_excellence-1-2020_EN/index.html#58 (pristupljeno 28.12.2020.)

[25] https://en.dmgmori.com/resource/blob/44766/1f31598e29bab1d913fd09208a37250a/pu0uk-ultrasonic-pdf-data.pdf (pristupljeno 28.12.2020.)

[26] https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic (pristupljeno 28.12.2020.)

[27] https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic/ultrasonic-linear/ultrasonic-20-linear (pristupljeno 28.12.2020.)

[28] https://machinetoolmarket.co.za/2020/03/04/complete-machining-of-advanced-materials-with-ultrasonic-20-linear/ (pristupljeno 29.12.2020.)

[29] https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic/ultrasonic-universal-monoblock/ultrasonic-50 (pristupljeno 2.1.2021.)

[30] https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic/ultrasonic-universal-monoblock/ultrasonic-65 (pristupljeno 2.1.2021.)

[31] https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic/ultrasonic-universal-monoblock/ultrasonic-85 (pristupljeno 5.1.2021.)

[32] https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic/ultrasonic-evo/ultrasonic-40-evo-linear (pristupljeno 5.1.2021.)

[33] https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic/ultrasonic-gantry-portal/ultrasonic-210-p (pristupljeno 5.1.2021.)

[34] https://en.dmgmori.com/products/machines/ultrasonic/ultrasonic-gantry-portal

(pristupljeno 5.1.2021.)

[35] https://dat.to2025.com/upload/att/pa/13063730-5FD5-4ED1-B244-A101DF9CA5DE.pdf (pristupljeno 22.1.2021.)