

# Fleksibilni sustav za obradu elektroerozijom

---

**Predovan, Bruno**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*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:235:149363>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-28**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Bruno Predovan

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Toma Udiljak

Student:

Bruno Predovan

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Tomi Udiljaku na strpljenju, savjetima i pomoći bez kojih pisanje ovog rada ne bi bilo moguće. Također se zahvaljujem g. Dušku Radoviću direktoru tvrtke Teh-Cut na iskazanom povjerenju i pristupu informacija unutar tvrtke.

Bruno Predovan





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:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bruno Predovan**

Mat. br.: 0035206953

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Fleksibilni sustav za obradu elektroerozijom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Flexible system for EDM machining**


Opis zadatka:

Stalna težnja sve većem stupnju automatizacije i autonomnosti obradnih sustava danas se očituje digitalizacijom obradnih sustava i sve češćim korištenjem pojmova kao što su inteligentni obradni sustavi, pametni obradni sustavi, virtualni obradni sustavi i digitalni blizanci. Značajnu fazu u razvoju obradnih sustava predstavljaju fleksibilni obradni sustavi koji u određenim proizvodnim uvjetima još uvijek predstavljaju najbolje rješenje. Fleksibilni obradni sustavi velike razine autonomnosti su česti kod konvencionalnih postupaka obrade, ali rijetki kod nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem. U radu treba dati algoritam rada i opis fleksibilnog sustava za obradu elektroerozijom koji je realiziran u tvrtki TEH-CUT. Najviše pažnje je potrebno posvetiti HW i SW komponentama koje su razvijene kako bi se omogućila učinkovita integracija svih modula uključenih u fleksibilni sustav za obradu elektroerozijom.

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

Zadatak zadan:  
28. studenog 2019.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Toma Udiljak

Datum predaje rada:  
**1. rok:** 21. veljače 2020.  
**2. rok (izvanredni):** 1. srpnja 2020.  
**3. rok:** 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 24.2. – 28.2.2020.  
**2. rok (izvanredni):** 3.7.2020.  
**3. rok:** 21.9. - 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS KRATICA I OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Pametne tvornice .....	3
2. FLEKSIBILNA PROIZVODNJA .....	5
2.1. Fleksibilni proizvodni sustavi.....	5
2.2. Preduvjeti za implementaciju FMS .....	6
2.2.1. Standardizacija .....	6
2.2.2. Sustavi za stezanje i paletizacija .....	8
2.2.3. Automatska izmjena obradaka .....	17
2.2.4. Automatska izmjena alata .....	20
2.2.5. Prednamještanje alata .....	23
2.2.6. Koordinatni mjerni uređaji .....	26
2.2.7. Hardverska i softverska rješenja u FMS .....	29
3. INTEGRIRANJE KONVENCIONALNE I NEKONVENCIONALNE OBRADU ODVAJANJEM U FLEKSIBILNI OBRADNI SUSTAV .....	33
3.1. Uvod .....	33
3.2. Glodanje.....	36
3.2.1. Stezanje obradaka.....	40
3.2.2. Rezni alati.....	42
3.2.3. Prihvati reznih alata.....	43
3.2.4. Visokobrzinska obrada .....	44
3.2.5. Tvrdna obrada .....	47
3.2.6. Suha obrada .....	48
3.3. Obrada elektro-erozijom (EDM) .....	50
3.3.1. Elektro-erozija umakanjem (žigom).....	50
3.3.2. Elektro-erozija žicom .....	53
4. ALGORITAM RADA FLEKSIBILNOG OBRADNOG SUSTAVA ZA OBRADU ELEKTRO-EROZIJOM.....	55

---

ZAKLJUČAK .....	65
LITERATURA.....	66
PRILOZI.....	68

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Ovisnost raznolikosti o količini proizvoda [1].....	1
Slika 2.	Evolucija proizvodnje [5] .....	2
Slika 3.	Ciljevi proizvodnih pogona [2].....	2
Slika 4.	Pokolm glodaće glave [10] .....	7
Slika 5.	Proces rukovanja alata i obratka [11].....	8
Slika 6.	Primjeri specijalnih steznih naprava [16], [17].....	9
Slika 7.	Univerzalne naprave i naprave za stezanje određenih skupina obradaka .....	10
Slika 8.	Modularne stezne naprave [11].....	10
Slika 9.	Stezni sustav s definiranom nul-točkom [11],[12].....	11
Slika 10.	Stezni mehanizam [12] .....	12
Slika 11.	Delphin stezni klipovi [12] .....	13
Slika 12.	Paleta s delphin steznim klipovima [12].....	13
Slika 13.	Referentni sustav GPS 240 [12].....	14
Slika 14.	Referentni sustav GPS 240- prikaz stezanja obratka [12] .....	14
Slika 15.	Macro referentni sustav [12].....	15
Slika 16.	Adapter paleta s postavljenim Macro referentnim sustavom [12].....	16
Slika 17.	Obradena površina s VDP steznim sustavom (lijevo) i bez (desno) [12] .....	16
Slika 18.	Primjer kružnog (roto) i linijskog magazina paleta [11].....	17
Slika 19.	Ovalni (lijevo) i linijski (desno) magazin obradaka s manipulatorom [12].....	17
Slika 20.	Način automatske izmjene obradaka [14].....	18
Slika 21.	Transponderi (System 3R) [12] .....	18
Slika 22.	Pozicija transpondera na GPS 240 paleti i Erowa paleti za EDM .....	19
Slika 23.	Ručni čitač ID-koda .....	19
Slika 24.	Automatski čitač ID-koda .....	19
Slika 25.	Softver za upravljanjem spremištem obradaka [12] .....	20
Slika 26.	Automatska izmjena alata s polugom [11].....	21

Slika 27.	Primjer kružnog magazina alata s polugom [15] .....	22
Slika 28.	Primjeri magazina alata: lančani (lijevo), regalni (desno) [18] .....	23
Slika 29.	Ticalo i način mjerenja alata na NU alatnim stroju [19].....	23
Slika 30.	Mjerenje alata s mirujućim i rotirajućim alatom [22] .....	24
Slika 31.	Beskontaktno mjerenje alata na NU alatnom stroju pomoću lasera [21].....	24
Slika 32.	Uređaj za prednamještanje alata tvrtke Zoller [20].....	25
Slika 33.	Koordinatni mjerni uređaj: horizontalni (lijevo) i vertikalni (desno) [23],[24].....	26
Slika 34.	Ispis mjernih podataka s CMM uređaja .....	27
Slika 35.	Primjer mjernog izvještaja s mjerenja EDM elektrode.....	28
Slika 36.	Primjer postavljanja komada na CMM pomoću robota [1] .....	28
Slika 37.	Horizontalna i vertikalna integracija [7] .....	29
Slika 38.	Od točke do točke i više spojna komunikacija [7] .....	30
Slika 39.	Tipovi topografije mreže [7] .....	30
Slika 40.	Primjer modula za generiranje i organiziranje radnih naredbi.....	32
Slika 41.	Model sklopljenog alata za tlačni lijev aluminija .....	34
Slika 42.	Otvoreni alat za tlačni lijev: označeni klizači (lijevo) i uski utori (desno) .....	34
Slika 43.	Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem [26].....	36
Slika 44.	5-osni glodači obradni centar DMG Mori HSC 55 Linear .....	37
Slika 45.	Simultano kopirno glodanje na 5-osnom obradnom centru .....	38
Slika 46.	Prsteni za stezanje i pozicioniranje .....	40
Slika 47.	Kubus .....	40
Slika 48.	Stezanje više komada na paleti .....	41
Slika 49.	Kombinacija paletnog sustava i modularnog stezanja .....	41
Slika 50.	Rezni alati za glodanje [10] .....	43
Slika 51.	Nekoliko vrsta HSK prihвата alata .....	43
Slika 52.	Dijagram ovisnosti temperature o brzini rezanja [27] .....	44
Slika 53.	Postignuta visina profila tradicionalnom (crveno) i HSM (plavo) obradom [28] .	45
Slika 54.	Glodača glava (fourworks) za High feed milling [10].....	46
Slika 55.	Način dovođenja SHIP-a [31] .....	49

Slika 56.	Coolcap prihvatni namijenjeni za hlađenje kroz glavno vreteno .....	49
Slika 57.	Shema erozimata [32] .....	50
Slika 58.	Erozimat GF P800 s upravljačkom jedinicom .....	51
Slika 59.	Elektrode od grafita.....	52
Slika 60.	Bakrene elektrode .....	52
Slika 61.	Stanje elektroda nakon obrade: jako gruba (A), gruba (B) i fina (C) .....	53
Slika 62.	EDM žicom [32] .....	54
Slika 63.	Fleksibilni proizvodni sustav za obradu elektro-erozijom.....	55
Slika 64.	Algoritam rada FMS-a na primjeru proizvodnje matrica .....	56
Slika 65.	Prikaz 3D modela lijevo i gotovog komada desno .....	57
Slika 66.	Uputstvo za pravilno stezanje obratka .....	58
Slika 67.	Umetanje obradaka na stanicu za ulaganje .....	59
Slika 68.	Automatsko upisivanje korekcija alata .....	60
Slika 69.	Držać za prihvat elektroda .....	60
Slika 70.	Prikaz elektrode iz TEBIS-a : 1 segment (lijevo), sklop ( desno) .....	61
Slika 71.	Spremište alata (elektroda) i obradaka.....	61
Slika 72.	Primjer simulacije erodiranja i pozicije erodiranja.....	62
Slika 73.	Primjer pozicioniranja prije erodiranja .....	62
Slika 74.	Mjerni izvještaj 3D skenera .....	63
Slika 75.	Greške prilikom EDM: preduboko erodirano (plavo), višak materijala (crveno) .	63

## POPIS KRATICA I OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
NC		numerical control
CNC		computer numerical control
NUAS		numerički upravljani alatni stroj
CPS		cyber-physical system
DoE		United States Department of Energy
NIST		National Institute of Standards and Technology
FMS		flexible manufacturing system
AIA		automatska izmjena alata
ISO		International Organization for Standardization
CAD		computer aided design
CAM		computer aided manufacturing
CIM		computer integrated manufacturing
CBN		kubični bor-nitrid (cubic boron nitride)
IoT		Internet of things
ICT		information and communications technology
DNC		direct numerical control
QR		quick response code
CMM		coordinate-measuring machine
2D		dvodimenzionalan
3D		trodimenzionalan
PLC		programmable logic controller
LAN		local area network
HRC		tvrdća po Rockwellu
DC		direct current
VDP		Vibration-Damped Palletisation
AIO		automatska izmjena obradaka
EDM		electric discharge machining
SHIP		sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
HSM		high speed machining
HFM		high feed milling
$R_a$	$\mu\text{m}$	srednje aritmetičko odstupanje hrapavosti površine
$R_t$	$\mu\text{m}$	teorijska hrapavost površine
$\chi_r$	$^\circ$	napadni kut oštrice alata
$v_c$	m/min	glavna brzina rezanja
$n$	$\text{min}^{-1}$	broj okretaja (frekvencija vrtnje)

---

$d$	mm	promjer alata
$v_f$	mm/min	posmična brzina
$f$	mm	posmak
$f_z$	mm	posmak po zubu
$z_c$		broj zubi
ML		minimum quantity lubrication
MC		minimum quantity cooling
MLC		minimum quantity cooling lubrication



## **SAŽETAK**

U završnom radu se proučava razvoj obradnih sustava koji imaju sve veće zahtjeve za fleksibilnošću i autonomijom. Da bi se omogućio veći stupanj fleksibilnosti i autonomije obradnih sustava potrebno je ispuniti mnoge preduvjete. Iz tog razloga svakodnevno se susreću pojmovi kao što su digitalizacija obradnih sustava, inteligentni obradni sustavi, pametni obradni sustavi, virtualni obradni sustavi, digitalni blizanci. Potpuno automatizirani obradni sustavi su češći kod konvencionalnih postupaka obrade, dok su kod nekonvencionalnih postupaka obrade odvajanjem mnogo rjeđi. Nekonvencionalni postupci obrade odvajanjem su kompleksniji, te se o samom procesu ne zna mnogo. To stvara probleme kod integracije takvih procesa, a ujedno ograničava stupanj fleksibilnosti i autonomije sustava. U prvom dijelu rada su opisane tehnologije koje su omogućile fleksibilnost proizvodnje. Opisane su dvije tehnologije, glodanje i elektro-erozija. U zadnjem dijelu je opisan algoritam rada fleksibilnog obradnog sustava za obradu elektro-erozijom koji je realiziran u kompaniji Teh-Cut.

Ključne riječi: Fleksibilna proizvodnja, fleksibilni proizvodni sustav, elektro-erozija, glodanje, paletni sustavi

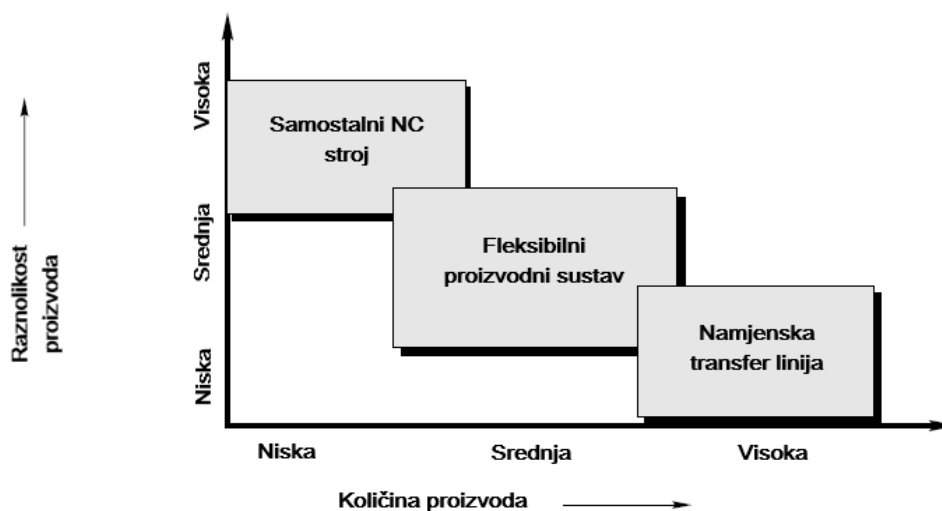
## **SUMMARY**

The undergraduate thesis examines the development of machining systems that have increasing demands for flexibility and autonomy. Many prerequisites need to be met to allow for greater flexibility and autonomy of machining system. For this reason, concepts such as digitization of machining systems, intelligent machining systems, smart machining systems, virtual machining systems, digital twins are encountered on a daily basis. Fully automated machining systems are more common in conventional machining processes, while in non-conventional machining processes they are much less common. Non-conventional machining operations are more complex and much less known about the process. This creates problems with integration processes while also limiting the degree of system flexibility and autonomy. The first part describes the technologies that enabled the flexibility of production. The second part deals with the integration of flexible manufacturing system with two technologies, milling and electric discharge machining. The last part describes an algorithm for the operation of a flexible manufacturing system for EDM implemented by Teh-Cut.

Key words: flexible manufacturing, flexible manufacturing system, electric discharge machining, milling, pallet system

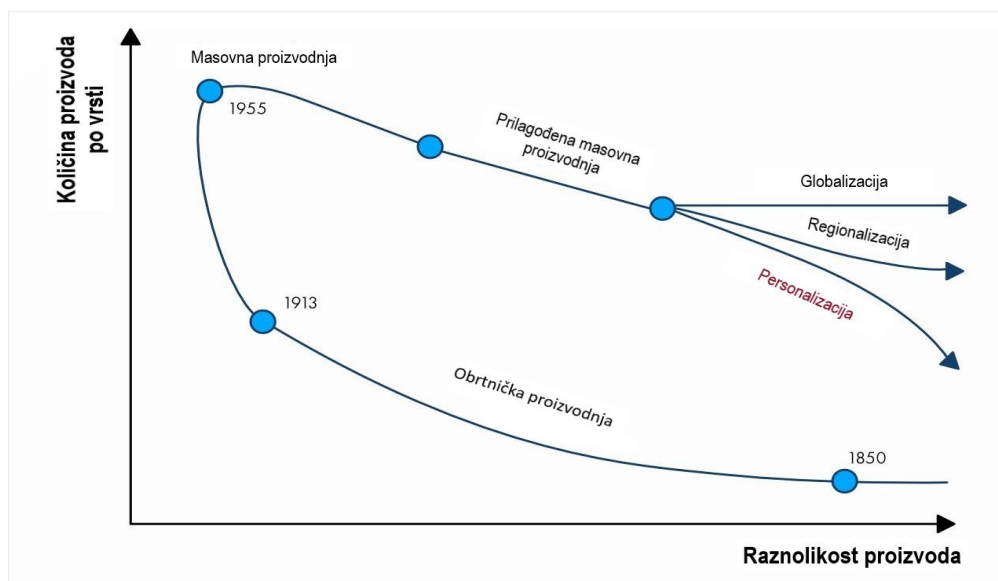
## 1. UVOD

U današnje vrijeme događaju se brojne promjene u industrijskoj proizvodnji, a naročito u razvoju novih tehnologija. Kako bi pratila brojne promjene na tržištu, bila u skladu s novom filozofijom potrošača, novim tehnologijama, industrija se mora mijenjati. Pojavom prvih oblika alatnih strojeva (klasičnih alatnih strojeva), proizvodnja je bila jako ograničena, malih količina te je kvaliteta proizvoda ovisila isključivo o znanju i iskustvu operatera. Pored toga, imali su visoku fleksibilnost, ali jako nisku proizvodnost. Razvoj računala omogućuje numeričko upravljanje alatnih strojeva, odnosno kasnije razvoj CNC alatnih strojeva. Glavna karakteristika CNC alatnih strojeva je mogućnost istodobnog i sinkroniziranog gibanja u više osi. Za ovakve strojeve je potrebna izrada programa koji definiira putanju alata tijekom obrade. To omogućuje obradu kompleksnijih geometrija i skraćuje vrijeme procesa. Ipak, izrada programa zahtjeva određeno znanje i vrijeme, stoga je pojedinačna proizvodnja i dalje bila skupa, te dolazi do pojave masovne proizvodnje i razvoja transfer linija. Proizvodnja pomoću specijaliziranih transfer linija koristi se za jednu vrstu proizvoda u velikim količinama. Takav sustav ima jako nizak stupanj fleksibilnosti i potrebu za velikim količinama kako bi uopće bio isplativ, što ga čini neprikladnim načinom proizvodnje za male serije, što je danas prevladavajući način proizvodnje. Nedostaci se nastoje izbjeći razvojem automatiziranih proizvodnih sustava s većom fleksibilnošću. Takvi sustavi se nazivaju fleksibilni proizvodni sustavi, te imaju mogućnost brze prilagodbe potrebama tržišta i novim proizvodima, a također postižu veću produktivnost i visok stupanj iskorištenja strojeva.



Slika 1. Ovisnost raznolikosti o količini proizvoda [1]

Kroz povijest se pojavljuju nekoliko karakterističnih razdoblja proizvodnje. Razvoj od obrtničke proizvodnje preko masovne i prilagođene masovne proizvodnje do personalizirane proizvodnje danas (slika 2).



Slika 2. Evolucija proizvodnje [5]

Pojavom globalizacije i digitalizacije kupci imaju neograničen uvid u konkurentske proizvode, te ih je potrebno privući. Najprije su se proizvodi razvijali za regionalno tržište, kako bi se prilagodili kulturi, klimi ili kupovnoj moći ciljanog tržišta, dok kasnije personalizacija postaje glavni marketinški trik za povećanje prihoda. Zahtjevi za personaliziranim proizvodima su sve veći, što dovodi do brojnih izazova u proizvodnim procesima i sustavima. Proizvode se personalizirani proizvodi u malim serijama, visoke kvalitete, kompleksnije geometrije, također se teži „Just in time“ načinu proizvodnje, s kraćim vremenima isporuke [2].



Slika 3. Ciljevi proizvodnih pogona [2]

Takav način proizvodnje ne bi bio moguć bez visoke razine fleksibilnosti i automatizacije, pri čemu strojevi postaju pametniji i autonomniji. Kako bi se to ostvarilo bilo je potrebno ispuniti brojne preduvjete. Pojavom interneta javljaju se prvi oblici digitalizacije sustava, komunikacija unutar sustava, povezivanje sustava s oblakom (cloud), što se skupa naziva internetom stvari (IoT). Sve te promjene koje su se događale u zadnjih nekoliko godina, a događaju se i danas, nazivaju se industrija 4.0.

### 1.1. Pametne tvornice

Koncept „pametne tvornice“ pojavljuje se uz pojavu industrije 4.0, te je usko povezan s implementacijom novih tehnologija u proizvodnji, a posebice kibernetičko-fizičkih sustava (eng. Cyber-physical system, CPS). Izraz pametna proizvodnja je predložilo nekoliko agencija iz SAD-a, kao što su DoE<sup>1</sup> i NIST<sup>2</sup> [3]. Europu predvodi Njemačka kao najsnažnije gospodarstvo, perjanica i glavni pokretač industrije 4.0. Oni predviđaju da će industriju u bliskoj budućnosti karakterizirati snažna individualizacija proizvoda, sa strojevima visoke razine fleksibilnosti i autonomnosti, uz integracija kupaca i poslovnih partnera u procesima proizvodnje. [3] Pametne tvornice su potpuno digitalizirane, te nastoje povezati suvremene informacijsko komunikacijske tehnologije (ICT), s fizičkom proizvodnjom i procesima. Kako bi to bilo moguće, potrebno je koristiti senzore za praćenje i prikupljanje brojnih podataka iz okoline. Podatke je potrebno obraditi i pravilno analizirati, iz tog razloga razvijaju se brojne tehnologije karakteristične za pametne tvornice. Neke od njih su detaljnije opisane u nastavku. Tehnologije koje su transformirale industrijsku proizvodnju [3],[4] :

- **Internet stvari (IoT, Internet of things)** - omogućuje komunikaciju i povezivanje putem internetske mreže raznih uređaja, senzora, strojeva, aplikacija ili vozila. Bitno je istaknuti komunikaciju stroja sa strojem, u stvarnom vremenu (real-time).
- **Računarstvo u oblaku ili oblak (Cloud computing ili cloud)** – omogućuje korištene podatkovnih centara i snažnih računala bez potrebe da svaka kompanija posjeduje svoju infrastrukturu. Ubrzanim razvojem senzora dolazi do potrebe za pohranom sve veće količine podataka, stoga je neophodno korištenja oblaka kao tehnologije. Jako je bitno naglasiti sigurnost podataka, koja zahtjeva konstantna ulaganja u kibernetičku sigurnost i nove protokole.

---

<sup>1</sup> DoE – United States Department of Energy

<sup>2</sup> NIST - National Institute of Standards and Technology, United States

- **Tehnologija velikih podataka (big data)** – služi za analiziranje i obradu ogromnih količina podataka iz raznih izvora. Podaci pohranjeni u oblaku su neupotrebljivi dok se ne analiziraju i prikažu u razumljivom i korisnom obliku, što je upravo svrha ove tehnologije.
- **Digitalni bliznac (digital twin)** – prikazuje zrcalnu sliku stvarnog (fizičkog) svijeta u virtualnom modelu. Omogućuje praćenje i simuliranje procesa, strojeva ili ljudi u stvarnom vremenu koristeći podatke raznih senzora. Digitalni blizanci integriraju nekoliko tehnologija kao što su umjetna inteligencija, internet stvari, strojno učenje, itd. Imaju sposobnost učenja i predviđanja na osnovu prethodnih parametara. To uvelike pomaže kod simuliranja nekih nepredviđenih situacija ili grešaka, te pomaže u optimizaciji procesa.
- **Umjetna inteligencija (artificial intelligence)** – nastaje razvojem računarstva, a omogućava računalima donošenje odluke ili učenje novih modela za rješavanje zadataka. Umjetna inteligencija uvelike olakšava rješavanje kompleksnih zadataka jer je sposobna učiti na prijašnjim problemima, te s iskustvom postaje inteligentnija. Danas je razvijena do te mjere da ima svojstva svjesnosti, komunicira s ljudima, prilagođava se situaciji, upravlja proizvodnim procesima, itd.
- **Aditivna proizvodnja (additive manufacturing)** – obuhvaća veći broj tehnologija, od kojih su najpoznatije: stereolitografija, selektivno lasersko sinteriranje i 3D printanje. Karakterizira je nanošenje materijala sloj po sloj, što omogućuje izradu vrlo kompleksnih geometrija. Najčešće se koristi za brzu izradu prototipa (rapid prototyping), dok se danas sve više koristi i kod izrade alata ili dijelova alata (rapid tooling), kao i za proizvodnju u manjim serijama. Ovom tehnologijom mogu se izraditi optimalni kanali za temperiranje koji prate nepravilnu geometriju, a samim time omogućuju pravilno hlađenje i bolju kvalitetu odljevka [6].

## 2. FLEKSIBILNA PROIZVODNJA

### 2.1. Fleksibilni proizvodni sustavi

Porastom tržišne konkurencije proizvođači odgovaraju raznim metodama. Uz stalni porast kvalitete i brzine isporuke, prilagodljivost postaje najvažnija strategija proizvodnje. Pojavljuje se pojam „agilnost“, odnosno agilni proizvođači, koji su najbrži, s najnižim troškovima proizvodnje i najuspješniji pri privlačenju novih kupaca, te kao takvi postaju konkurentniji na tržištu. Agilnost se postiže implementacijom fleksibilnih proizvodnih sustava (FMS). Takav način proizvodnje zahtjeva promjene u načinu razmišljanja, pri čemu se mijenja način planiranja, prilagođava se tehnologija obrade, uz velika ulaganja u najsuvremenije tehnologije. FMS je proizvodni sustav s karakterističnim rasporedom strojeva i pomoćnih uređaja, međusobno povezanih nekim automatiziranim transportnim sredstvom. Sirovci su najčešće postavljeni na označene palete u regalnom skladištu. Cijelim sustavnom upravlja središnja upravljačka jedinica odnosno glavno računalo [7].

Osnovni ciljevi fleksibilnih proizvodnih sustava su [7]:

- **Unaprijediti kontrolu i upravljanje :**
  - Smanjenjem broja nekontroliranih varijabli
  - Smanjivanjem ovisnosti o ljudskoj komunikaciji
  - Korištenjem alata za brzo prepoznavanje i reagiranje na greške
- **Minimizirati ljudski rad :**
  - Udaljavanjem operatera s mjesta obrade
  - Nadoknaditi nedostatak kvalificirane radne snage
  - Smanjiti troškove rada
- **Unaprijediti kratkoročne odgovore na probleme kao što su :**
  - Promjena inženjera ili procesa
  - Programske greške, kvarovi, lom alata
  - Kašnjenje materijala
- **Unaprijediti dugoročne usluge brzim i jednostavnim prilagodbama :**
  - Promjena proizvodnih količina i uvođenje novih proizvoda
  - Povećanje produktivnosti strojeva
  - Standardizacija

Visoka razina fleksibilnosti uz težnju ka ostvarenju svih ciljeva FMS-a postepeno se ostvarivala kroz nekoliko karakterističnih faza. Počevši 1970.-ih godina uporabom računala u proizvodnji do danas implementacijom kibernetičko-fizičkih sustava.

Faze razvoja modernih proizvodnih sustava :

- 1) Automatizacija
- 2) Fleksibilnost
- 3) Integracija
- 4) Inteligencija

Glavni pokretač automatizacije je integracija svih elemenata i softvera u proizvodnji, a počela je korištenjem računala u proizvodnim procesima i razvojem raznih CAD/CAM sustava. Uvelike je rasla produktivnost i ponovljivost, a također se zamjenjuje čovjek u mnogim teškim i monotonim poslovima. Strojevi su opremljeni s magazinom alata i manipulatorom (polugom) za automatsku izmjenu alata (AIA). Stroj je sposoban raditi i bez operatera, izvan njegovog radnog vremena. Intenzivnijom integracijom softvera i digitalizacijom proizvodnja postaje fleksibilnija. Sljedeća faza koja se pojavljuje danas je pojava pametnih proizvodnih sustava, koje karakterizira određena razina autonomnosti.

## **2.2. Preduvjeti za implementaciju FMS**

Za integracija svega navedenog potrebno je ispuniti mnoge preduvjete, kako tehničke tako i organizacijske. Prvi korak je pronalazak partnera koji pruža savjetovanje uz svu potrebnu inženjersku podršku tijekom optimizacije i instalacije sustava. Odabir pravog partnera je jako bitan zbog iskustva, savjeta i neophodne edukacije, kako inženjera tako i operatera. Za iskorištenje punog potencijala automatizacije i fleksibilne proizvodnje potrebno je se usredotočiti na nekoliko područja koja će biti opisani u sljedećim poglavljima [8].

### **2.2.1. Standardizacija**

Standardizacija je proces koji nastoji uobičajene proizvodne procese učiniti što sličnijima sa što manje varijanti uz implementaciju postojećih standarda i normi (npr. ISO norme). Ona se ostvaruje analizom proizvodnje, odnosno potrebno je prepoznati koji su procesi najprikladniji za postizanje zadanih ciljeva. To je moguće ostvariti u raznim područjima kao što su: odabir sirovina, način stezanja, mjere (tolerancije), tehnologija i parametara obrade, alata, način konstruiranja [9].



Ciljevi standardizacije u fleksibilnoj proizvodnji [8]:

- Smanjenje zalihe materijala, gotovih proizvoda i alata
- Standardizirati alate i palete
- Planiranje procesa
- Standardizirati nul-točke
- Olakšati i ubrzati proces konstrukcije
- Olakšati i ubrzati proces odabira tehnologije i parametara obrade
- Ubrzati proces stezanja komada
- Sniziti troškove kontrole
- Minimizirati greške

Proces standardizacije nije jednostavan, stoga je potrebno postupno testirati koji se dijelovi procesa i na koji način mogu standardizirati. Na primjer, prilikom odabira alata jako je bitno utvrditi koje alati se najčešće koriste, pri kojim parametrima obrade, s kakvim prihvata i koje duljine. Testiranjem u pogonu tvrtke Teh-Cut došlo se do saznanja da pojedini alati imaju mnogo veću postojanost i produktivnost prilikom obrade sirovih i kaljenih komada. Koriste se glodaće glave tvrtke Pokolm koja ima cijelu paletu raznih alata za grubu obradu (Slika 4, lijevo). Za grubu obradu planskih površina nakon kaljenja na dodatak od 0,05 mm za završnu obradu, odabrana je glodaća glava „Spinworks“ (Slika 4, sredina). Ovaj alat sa svojim rotirajućim tvrdometalnim pločicama pokazao je jako dobre karakteristike i veliku produktivnost, stoga je odabran u paletu standardnih alata. Nakon ovog alata najčešće je potrebno postići ravnost površine, a najčešće i jako uske tolerancije. Za takvu vrstu primjene odabrana je glodaća glava „Mirrorworks“ (Slika 4, desno), koja je također pokazala jako dobre karakteristike.



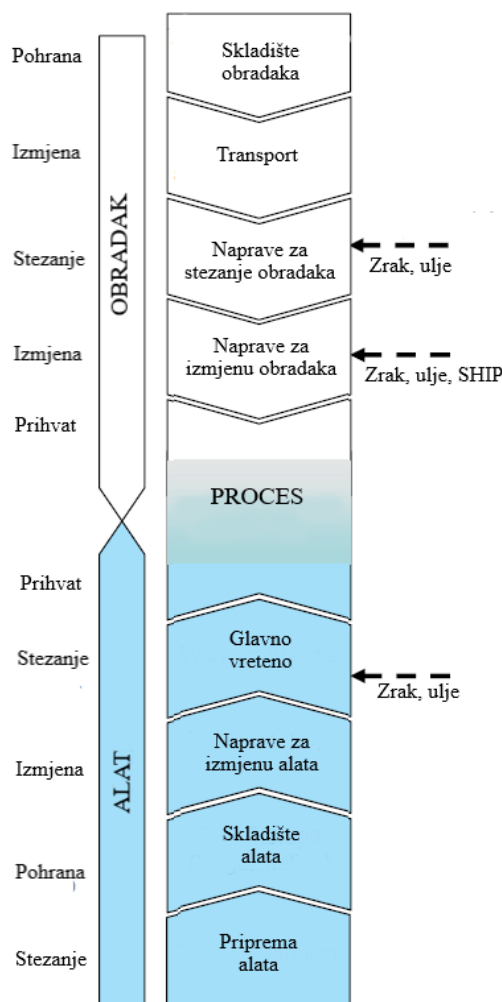
Slika 4. Pokolm glodaće glave [10]

Ovakav odabir standardnih alata omogućuje jednostavan odabir tehnologije s već definiranim parametrima obrade, a samim time je programiranje mnogo brže i s manje grešaka.

Standardizacija nul-točke obrade znači da se prilikom programiranja nul-točku postavljamo uvijek na isto mjesto. To se postiže uvođenjem paletnog sustava i sustava za stezanje obradaka s unaprijed definiranom pozicijom nul-točke, što će biti opisano u sljedećem dijelu.

### 2.2.2. Sustavi za stezanje i paletizacija

Tradicionalnim metodama stezanja kod postupaka obrade odvajanjem čestica pomoćna vremena zauzimaju jako velik udio u ukupnom vremenu izrade nekog proizvoda, također povisuju cijenu izrade. Najveći udio pripremnog i završnog vremena gubi se na rukovanje i pripremu alata i obradaka (Slika 5). Stoga se razvijaju novi sustavi stezanja. Jedan od njih je i sustav stezanja s definiranom nul-točkom koji osigurava preduvjete za paletizaciju.



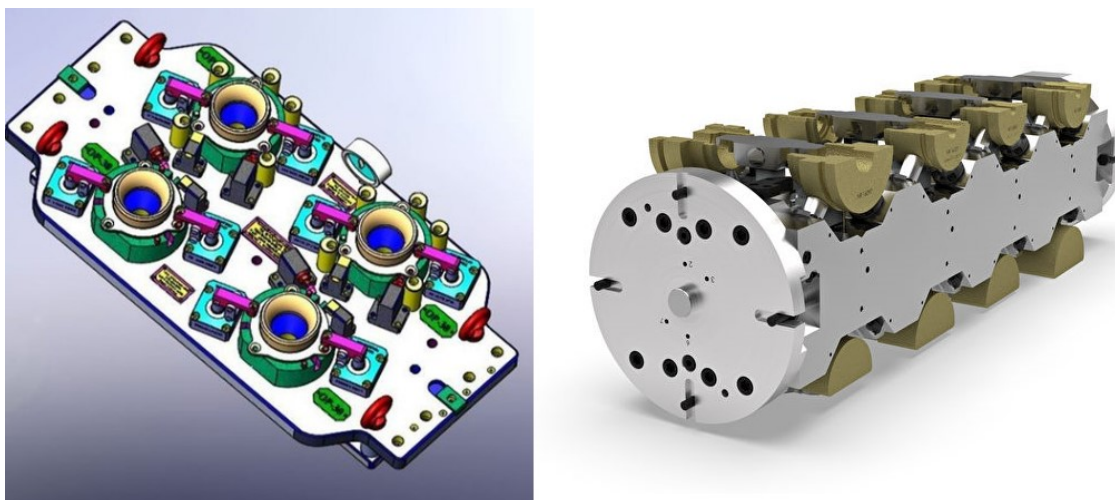
Slika 5. Proces rukovanja alata i obratka [11]

Proces rukovanja obradcima ima nekoliko faza koje se mogu podijeliti na: stezanje i pozicioniranje, izmjena i transport obradaka. Stezne naprave se koriste za prihvat i fiksiranje obratka na radni stol stroja tijekom operacija kao što su obrada odvajanjem čestica, zavarivanje, montaža ili deformiranje. Njihova svrha je zadržati radni komad u predviđenoj poziciji usprkos utjecaja sila obrade, vibracija ili temperaturnih dilatacija. Sila stezanja se može ostvariti na nekoliko načina, najčešće mehaničkim, hidrauličkim, pneumatskim ili magnetskim djelovanjem.

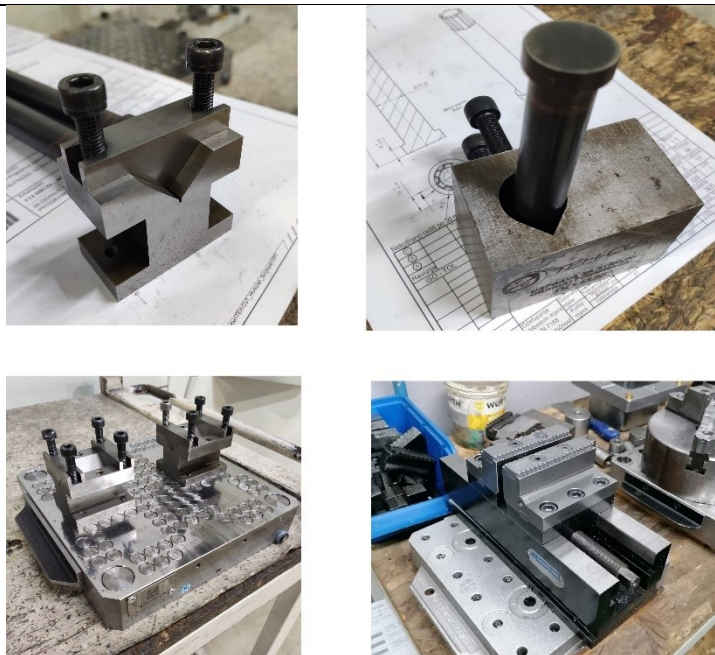
Vrste naprava za stezanje:

- Specijalne stezne naprave
- Stezne naprave za skupine obradaka
- Univerzalne stezne naprave
- Modularne stezne naprave
- Stezni sustavi s definiranom nul-točkom

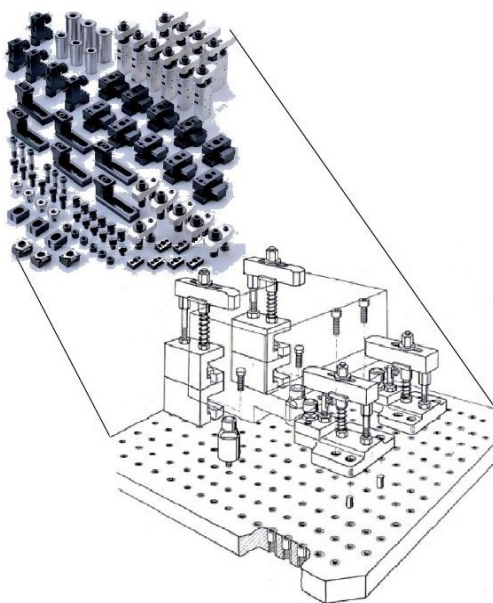
Specijalne stezne naprave su namijenjene za jednu skupinu obradaka, te se koriste najčešće u serijskoj proizvodnji (Slika 6). Karakteriziraju ih visoka točnost i stabilnost, ali jako mala fleksibilnost. Stezne naprave za određene skupine obradaka i univerzalne stezne naprave imaju mogućnost prilagodbe određenim skupinama obradaka slične geometrije (Slika 7). Imaju manju točnost, ali veći fleksibilnost. Modularne stezne naprave se mogu koristiti za kompleksnije obradke (Slika 8). Sastavljene su od više dijelova kao što su temeljne ploče, vertikalne temeljne ploče i ostali dijelovi za stezanje i pozicioniranje. Imaju jako dobro točnost, od 0,01 do 0,03 mm, visoku fleksibilnost i jako niske troškove ulaganja. Nedostatak im je potreba za puno ručnog rada, a samim time i duže vrijeme stezanja komada [11].



Slika 6. Primjeri specijalnih steznih naprava [16], [17]



**Slika 7. Univerzalne naprave i naprave za stezanje određenih skupina obradaka**



**Slika 8. Modularne stezne naprave [11]**

Sustavom stezanja s definiranom nul-točkom postiže se brzo i precizno stezanje obratka uz odličnu ponovljivost (Slika 9). Najčešće se koriste kod obrade odvajanjem čestica na CNC strojevima, kod obrade elektro-erozijom (EDM), ali i kod mjernih uređaja. Ovi sustavi su preduvjeti za automatizaciju i višu razinu fleksibilnosti proizvodnog sustava. Njegovom integracijom se omogućuje uvođenje paletizacije i automatske izmjene obradaka [11].



**Slika 9. Stezni sustav s definiranom nul-točkom [11],[12]**

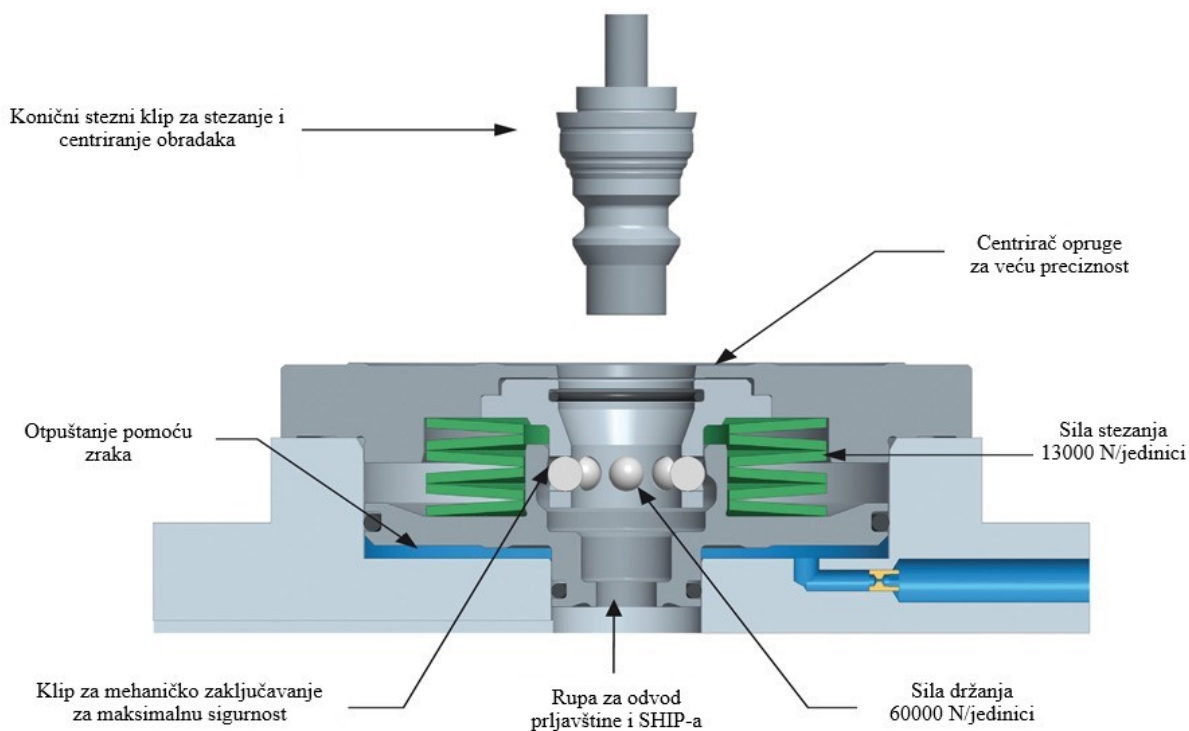
Uvođenjem sustava stezanja s definiranom nul-točkom postiže se [12]:

- Minimalizacija pomoćnog vremena
- Manje pogrešaka pri postavljanju
- Priprema na stroju je zamijenjena vanjskom pripremom
- Povećanje kvalitete
- Veća fleksibilnost
- Veće iskorištenje strojeva
- Standardizacija metoda rada

Brzom izmjenom komada, palete ili naprave, postiže se drastično kraće pripremno vrijeme, čak i do 90 %. Izmjena komada se najčešće odnosi na izmjenu paleta sa stegnutim novim komadom. Priprema, pozicioniranje i stezanje novog radnog komada se odvija izvan stroja, bez potrebe da stroj stoji, čime se povećava iskoristivost i produktivnost strojeva. U procesu obrade jako je bitno pozicioniranje obratka u stroju, koje je određeno nul-točkama.



Nul-točka je referentna točka obrade i ishodište koordinatnog sustava pomoću kojega je definirana putanja gibanja glavnog vretena. Treba razlikovati nul-točku stroja, nul-točku stezne naprave, nul-točku palete i nul-točku obratka. Uvođenjem paletnog sustava stezanja s definiranom nul-točkom omogućuje se stalni odnos među nul-točkama. Također se osigurava visoka ponovljivost pozicioniranja ( $< 0.005$  mm), čak i ako se palete prenose na drugi stroj. Opisan je način stezanja i pozicioniranja pomoću steznih čeljusti (eng. chuck) i steznog klipa (eng. drawbar) koji je razvijen u Tvrtci System 3R. Stezne čeljusti su najčešće vezane za radni stol stroja i imaju funkciju stezanja palete odnosno obratka. Sila stezanja se može ostvariti pomoću ulja (hidraulički), zraka (pneumatski) ili ručnim pritezanjem (mehanički). Najčešće se koriste stezne čeljusti s hidrauličkim (za veće sile) i pneumatskim (za manje sile) radnim medijem jer omogućuju automatsko stezanje i otpuštanje.



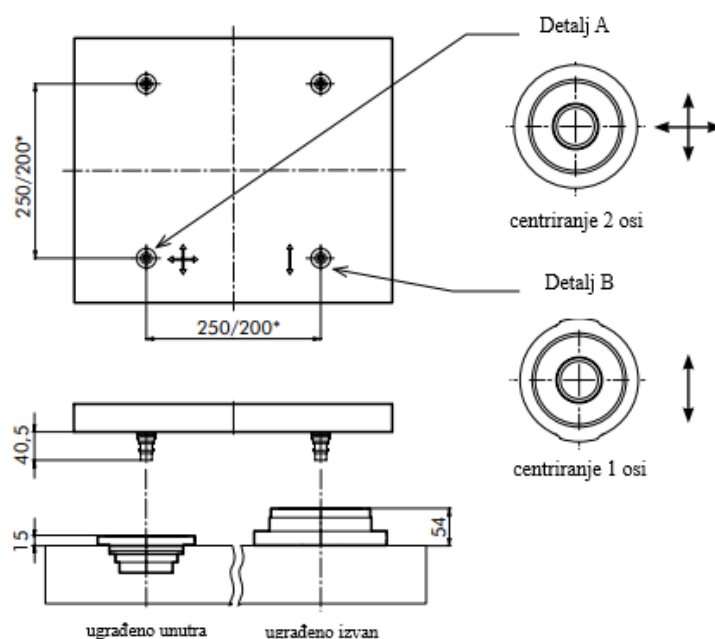
**Slika 10. Stezni mehanizam [12]**

Princip rada steznog mehanizma je prikazan na slici 10. Sila stezanja se ostvaruje preko opruge u otpuštenom položaju, pri čemu djeluje na klip koji svojom geometrijom prenosi silu na kuglice i dovodi konični stezni klip u točno određen položaj. Otpuštanje se vrši pomoću zraka, djelovanjem na klip sabijanjem opruge sve dok se kuglice ne otpuste. Ovaj način stezanja nam omogućuje sigurno stezanje čak i kad nestane zraka (ili ulja) u sustavu, što uvelike osigurava dodatnu sigurnost [12],[13].

Za pozicioniranje s „Delphin“ sustavom potrebne su tri vrste steznih klipova (Slika 11). Postavljaju se tako da jedan ima funkciju centriranja dvije osi (a), jedan centrira jednu os (b), dok su ostali slobodni (c) i služe samo za stezanje. Način postavljanja na delphin paletu i njihov raspored je prikazan na slici 12.



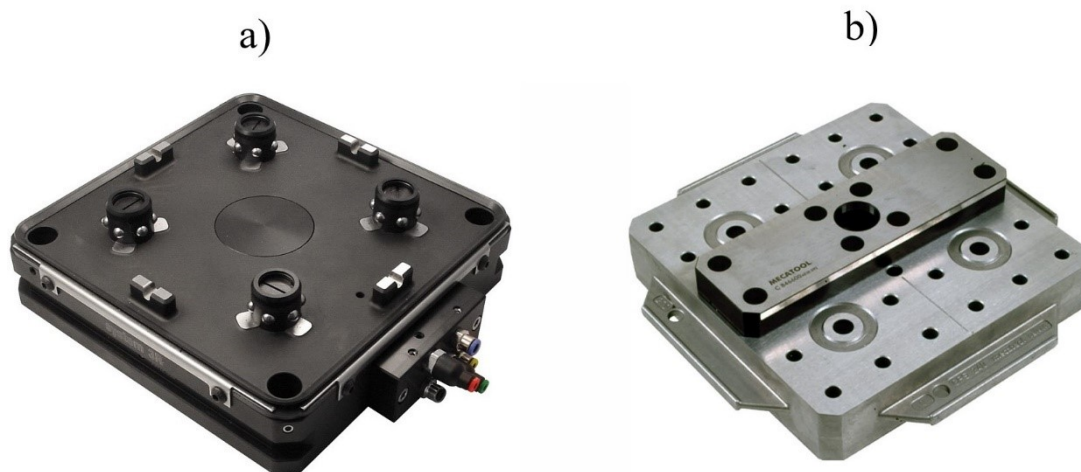
Slika 11. Delphin stezni klipovi [12]



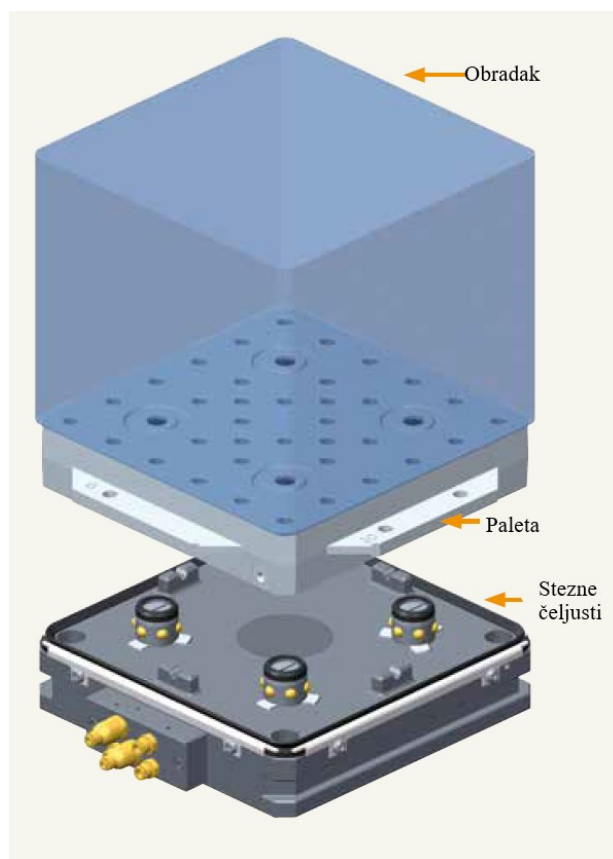
Slika 12. Paleta s delphin steznim klipovima [12]

Osim većih sustava kao što su delphin referentni sustav, razvijeni su još mnogi sustavi stezanja koji se integriraju ovisno o zahtjevima dimenzija i sile stezanja prilikom obrade. Oni također omogućuju automatsku izmjenu i pozicioniranje obradaka. Neki od njih su GPS 240 referentni sustav (Slika 13, a i 14), Macro referentni sustav (Slika 15), VDP (eng. Vibration-Damped Palletisation), itd. GPS 240 se koristi kod srednjih veličina obradaka, do 150 kg. Stezanje se osigurava s četiri stezne čeljusti (Slika 13, a). Pozicioniranje se ostvaruje s četiri čelična elastična zatika koji ulaze u posebno dizajnirane utore i svojom deformacijom zadržavaju

položaj palete u x/y ravnini. Postiže se jako dobra točnost i ponovljivost pozicioniranja, manja od 0,005 mm. Ovakav sustav je pogodan za automatsku i za ručnu izmjenu paleta jer se koriste lagane lijevane aluminijske palete s ručkama. Uz GPS 240 sustav potrebno je osigurati kontrolnu paletu (Slika 13, b), s fino brušenim elementom za definiranje nul-točke steznog sustava. Nul-točka se nalazi u centru GPS 240 sustava [12].



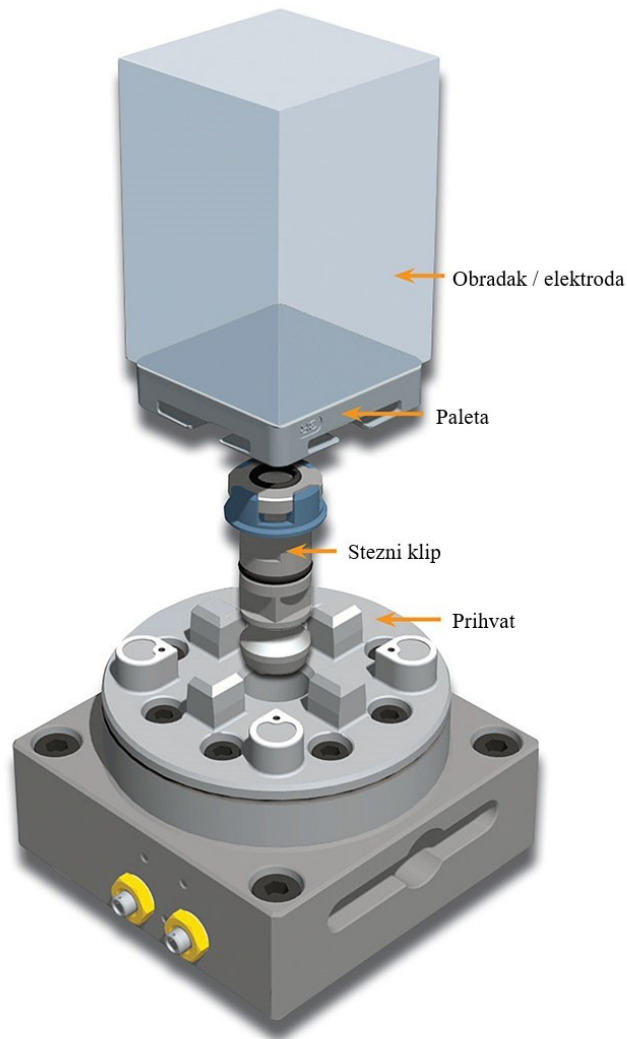
Slika 13. Referentni sustav GPS 240 [12]



Slika 14. Referentni sustav GPS 240- prikaz stezanja obratka [12]



Za manje obratke (do 50 kg) primjenjuju se referentni sustavi kao što su Macro referentni sustavi (Slika 15), koji najčešće svoju primjenu nalazi kod obrade elektro-erozijom. Omogućuju brzo stezanje i pozicioniranje elektroda za EDM na stroj za izradu, prenošenje na mjerni uređaj, a zatim na vreteno stroja za EDM. Postiže se točnost pozicioniranja čak do 0,001 mm što minimalizira greške prilikom stezanja. Prihvat postiže silu stezanja od 6000 N uz potreban tlak od 6 bara [12].



**Slika 15. Macro referentni sustav [12]**

Macro referentni sustav može biti postavljen na vreteno stroja za EDM, na mjerni uređaj ili na obradni stroj za izradu elektroda. Za izradu elektrode glodanjem potrebno je postaviti Macro sustav na adapter paletu (Slika 16) koja se najčešće steže na GPS 240 referentni sustav stroja.

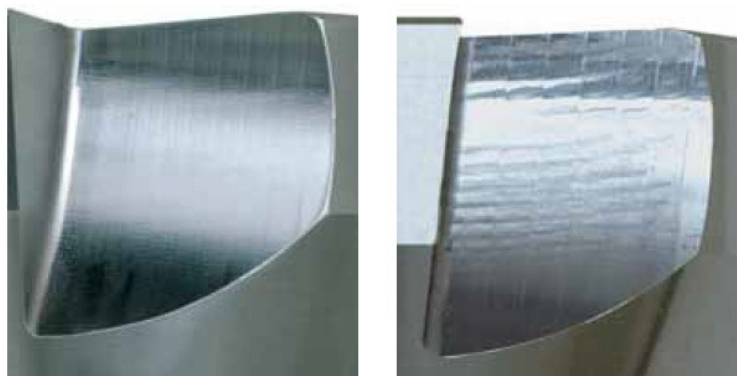


**Slika 16. Adapter paleta s postavljenim Macro referentnim sustavom [12]**

Tijekom obrade javljaju se vibracije, stoga je System 3R razvio posebni sustavi stezanja s mogućnošću prigušivanja vibracija, VDP sustav stezanja. Korištenjem polimera u konstrukciji prihvatne palete postiže se upijanje nastalih vibracija. Uz manje vibracije obratka i alata, obrada se izvodi većim brzinama rezanja uz manje trošenje alata i s boljom kvalitetom obrađene površine [12].

Prednosti VDP sustava stezanja [12]:

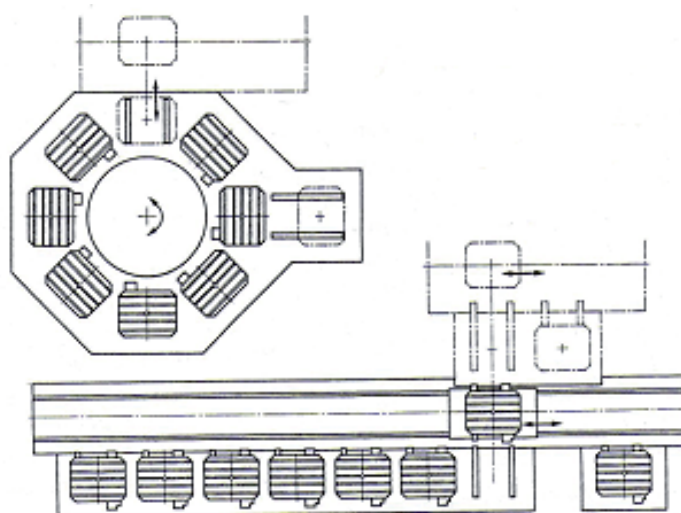
- Bolja kvaliteta obrađene površine smanjuje potrebu za završnom obradom
- Veća brzina rezanja povećava produktivnost
- Manje trošenje alata
- Manje vibracije na glavnom vretenu
- Bolja dimenzijska točnost i postizanje uskih tolerancija
- Veća fleksibilnost kod obrade raznih materijala i kompleksnih geometrija
- Kraće vrijeme isporuke
- Niža razina buke



**Slika 17. Obradena površina s VDP steznim sustavom (lijevo) i bez (desno) [12]**

### 2.2.3. Automatska izmjena obradaka

Proizvodna poduzeća nastoje minimizirati svaki nepotreban zastoje i radnje koje ne donose novu vrijednost. Izmjena obradaka je zahtijevala zaustavljanje stroja, postavljanje, stezanje i pozicioniranje novog obradka što uzrokuje manje iskorištenje i produktivnost strojeva. To se nastoji izbjeći automatskom izmjenom obradaka (AIO) i implementacijom paletnog sustava. Također velik napredak se postigao uvođenjem sustava stezanja s definiranom nul-točkom što omogućuje automatski rad bez potrebe za novim pozicioniranjem (opisano u poglavlju 2.2.2.). Postiže se znatna ušteda na vremenu jer se obradak s paletom odlaže u međuspremište (npr. regalno spremište paleta) za vrijeme rada stroja, te se nakon završetka jednog komada napravi automatska izmjena s neobrađenim komadom. Paleta se ulažu preko stanice za ulaganje (eng. loading station) te se nekom od transportnih sredstava ulažu u spremište. Izbor spremišta (magazina) ovisi o obradcima, vrstama paleta i okruženju. Mogu biti rotacijska, ovalna ili linijska (Slika 18).



Slika 18. Primjer kružnog (roto) i linijskog magazina paleta [11]

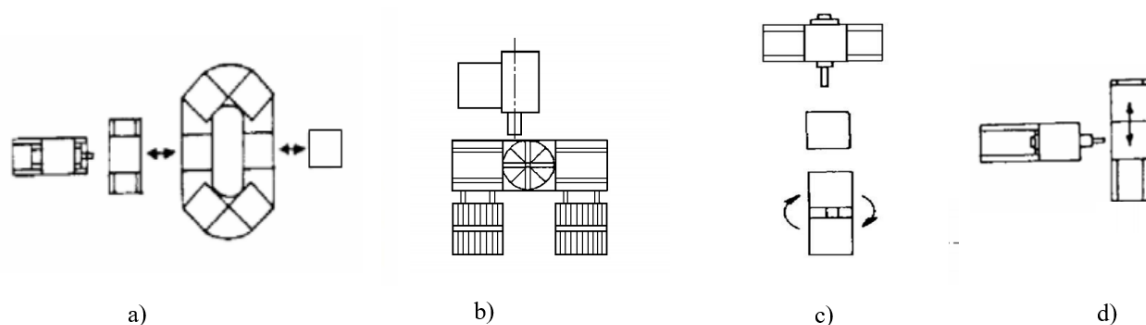


Slika 19. Ovalni (lijevo) i linijski (desno) magazin obradaka s manipulatorom [12]

Način na koji se vrši izmjena obradaka ovisi o izvedbi stroja ili ćelije. Može se gibati (mijenjati) radni stol ili samo paleta.

Način na koji se vrši izmjena obradaka [14]:

- AIO paletom i magazinom obradaka (a)
- AIO paletom s dva manipulacijska stola (b)
- AIO paletom i okretnim manipulacijskim dvopaletnim stolom (c)
- AIO gibanjem stola (d)



**Slika 20. Način automatske izmjene obradaka [14]**

Kod fleksibilnih obradnih sustava najčešća je izvedba s manipulatorom i regalnim spremištem paleta (Slika 19). Omogućuje veću fleksibilnost i autonomiju sustava, čime se postiže rad bez operatera, rad vikendima i praznicima. Potrebna je integracija i komunikacija između svih sudionika sustava kao što su stroj, manipulator, spremište, stanice za ulaganje, stanice za ispiranje i sušenje, mjerni uređaji itd. Upravljanje se vrši preko središnjeg računala i softvera za upravljanje (eng. cell management). Svaka paleta treba biti označena s jedinstvenim identifikacijskim kodom (ID-kod). Kao nosače koda koriste se transponderi (čipovi) pričvršćeni na svaku paletu (Slika 21). Jako je bitna njihova pozicija zbog automatskog očitavanja koda kako bi manipulator imao pristup transponderu (Slika 22).



**Slika 21. Transponderi (System 3R) [12]**



**Slika 22. Pozicija transpondera na GPS 240 paleti i Erowa paleti za EDM**

Očitavanje koda se vrši čitačem koji može biti ručni ili automatski upravljani manipulatorom. Vrši se na način da čitač šalje elektromagnetski signal na transponder te očitava povratni signal koji sadrži njegov jedinstveni ID-kod. Takav način omogućuje beskontaktni prijenos koda i automatsko očitavanje.



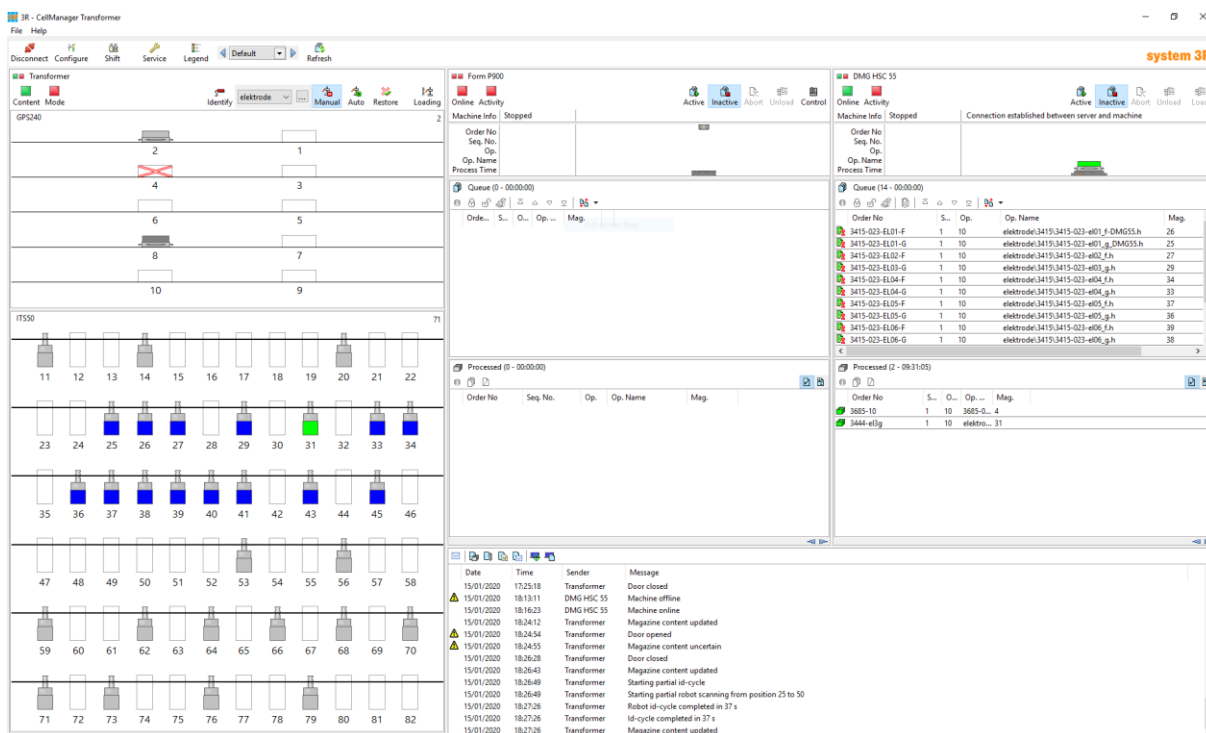
**Slika 23. Ručni čitač ID-koda**



**Slika 24. Automatski čitač ID-koda**



Paleta s neobrađenim komadom se postavlja na stanicu za ulaganje te se softverom zadaju naredbe za pospremanje palete u spremište. Također pomoću softvera za upravljanje se prazni spremište, vade se gotovi komadi, vizualno provjeravaju, a zatim skidaju s palete. To se odvija neovisno o radu stroja što uvelike skraćuje pomoćno vrijeme. Također softverom se zadaju naredbe koje povezuju NC program i ID-kod palete u spremištu. Time se definira pozicija palete i NC program radnog komada na paleti. U drugom dijelu softvera se organizira redosljed operacija na način koji najbolje odgovara korisniku. Također, moguće popraviti i ponovno pokrenuti neke operacije koje su imale grešku ili neku drugu smetnju te stoga nisu izvršene.

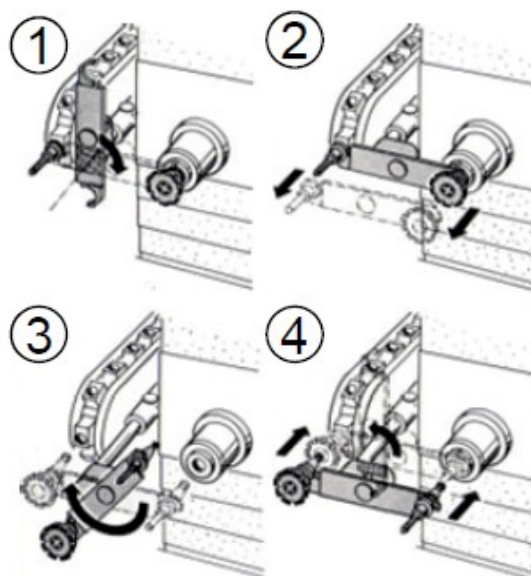


Slika 25. Softver za upravljanjem spremištem obradaka [12]

#### 2.2.4. Automatska izmjena alata

Porastom kompleksnosti proizvoda, veći zahtjevi za točnost i kvalitetu površine utječu na porast broja alata potrebnih za obradu. Ručna izmjena alata nakon svake operacije traje neko određeno vrijeme koje se također uzima u obzir kao pomoćno vrijeme. S ciljem smanjenja vremena izmjene i stezanja alata razvija se automatska izmjena alata (AIA). Automatska izmjena alata se odnosi na izmjenu alata između spremišta alata i glavnog vretena stroja. Strojevi opremljeni s sustavom za automatski izmjenu alata nazivaju se obradni centri, a sastavni su dio fleksibilnih obradnih ćelija i fleksibilnih obradnih sustava. AIA omogućuje automatski rad i veću fleksibilnost stroja, jer više nije potrebna prisutnost operatera za ručno mijenjanje alata nakon svake operacije. Izmjena alata se najčešće vrši pomoću manipulatora ili poluge za izmjenu alata.

Bitna karakteristika automatske izmjene alata je priprema sljedećeg alata za vrijeme obrade pri čemu se postižu znatne uštede na vremenu izmjene. Poluga tako ima hvataljke na oba kraja dok manipulator ima dvije hvataljke jednu pored druge. Priprema se vrši na način da se sljedeći alat preuzme iz spremišta u hvataljku, neovisno o obradi te nakon završetka operacije alat iz glavnog vretena se preuzima u slobodnu hvataljku dok druga sa sljedećim alatom dolazi u položaj za izmjenu i umetanje alata u glavno vreteno. Nakon preuzimanja i stezanja alata u glavno vreteno stroj nastavlja s obradom dok poluga (manipulator) odlaže iskorišteni alat u spremište i vraća se u neutralni položaj (Slika 26).



Slika 26. Automatska izmjena alata s polugom [11]

Osnovne pretpostavke automatske izmjena alata su [14]:

- Adekvatni držači alata (ISO-SK, HSK)
- Prednamještanje alata
- Numeričko upravljanje alatnim strojem
- Adekvatni prihvat za polugu izmjenjivača alata
- Manipulator ili poluga za izmjenu alata
- Spremnik alata
- Kodiranje alata
- Automatsko stezanje držača alata u glavnom vretenu
- Kontrola (detekcija loma i potrošenosti rezne oštrice alata)

Za automatiziran rad fleksibilnog obradnog sustava, pri čemu se obrađuje nekoliko različitih obradaka tijekom noći ili vikenda potreban je velik broj različitih i više istih (sestrinskih) alata, stoga je jako bitno osigurati dovoljan broj prihvata i držača alata kako se ne bi ograničile proizvodne mogućnosti. Iz tog razloga spremište alata treba imati dovoljan kapacitet kako bi uopće bilo moguće ispuniti sve zahtjeve fleksibilne i automatizirane proizvodnje.

Spremišta (magazini) alata prema obliku se dijele na [14]:

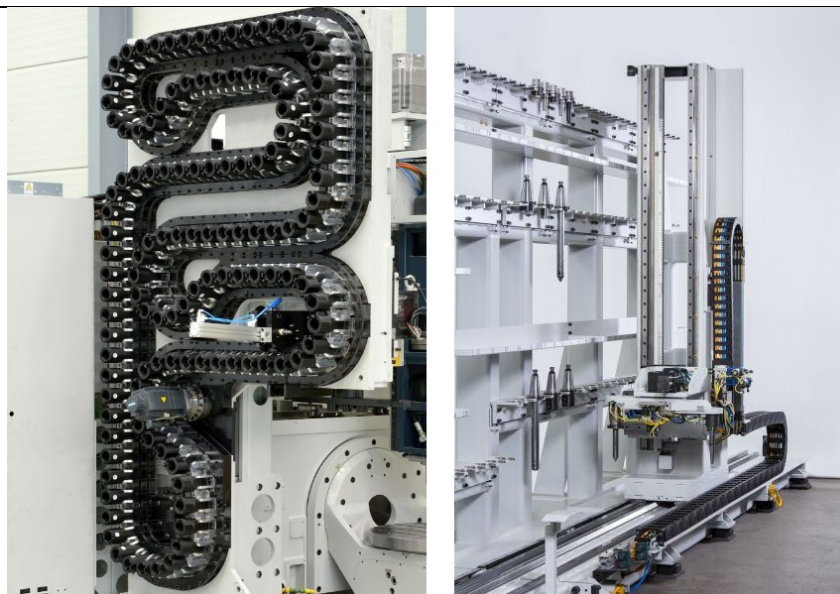
- Kružna
- Lančana
- Kazetna
- Regalna
- Revolverske glave

Revolverska glava se uglavnom pojavljuje kod tokarskih obradnih centara, dok su ostali oblici magazina alata karakteristični za glodaće obradne centre. Danas se najčešće pojavljuju regalni i lančani oblici magazina alata, jer omogućuju veliki kapacitet uz najmanje dimenzije spremišta (Slika 28). Alati se u spremištu mogu biti postavljeni tako da se poredaju po redoslijedu odvijanja operacija ili nasumično postavljeni što zahtjeva kodiranje držača.



**Slika 27. Primjer kružnog magazina alata s polugom [15]**





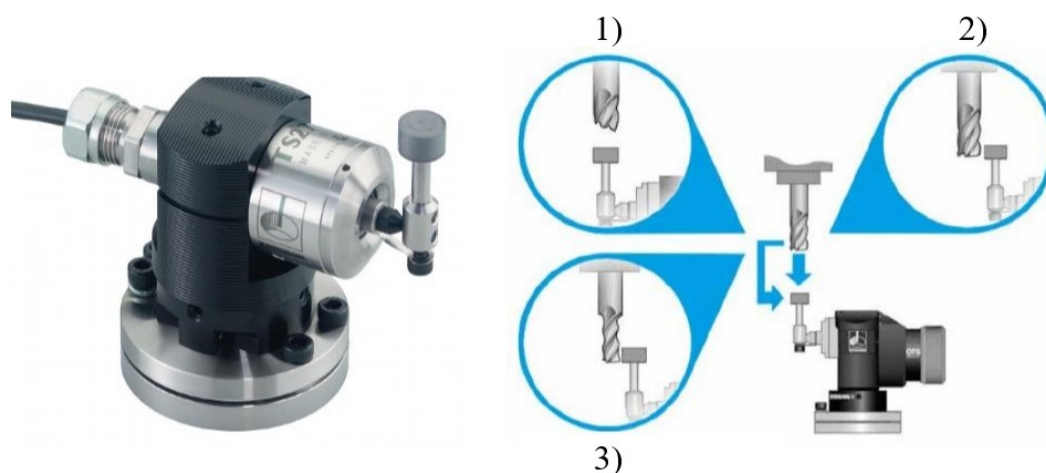
Slika 28. Primjeri magazina alata: lančani (lijevo), regalni (desno) [18]

### 2.2.5. Prednamještanje alata

Prednamještanje alata je proces pripreme alata za obradu, a izvodi se prije same obrade. Potrebno je postaviti oštricu alata na definirane dimenzije, te potom izmjeriti određene karakteristike alata (najčešće duljinu i radijus). Zatim se izmjereni podatci unose u upravljačku jedinicu stroja na za to predviđeno mjesto. Podatci se zapisuju automatski ako se mjere na stroju, dok se mogu zapisati ručno ili automatski putem mreže ako se mjere izvan stroja [19].

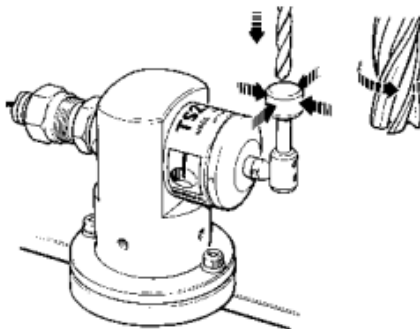
Prednamještanje alata se može izvoditi na:

- Samom NU alatnom stroju (kontaktno ili beskontaktno) (Slika 29 i 31)
- Uređaju za prednamještanje alata izvan NU alatnog stroja (Slika 32)



Slika 29. Ticalo i način mjerenja alata na NU alatnim stroju [19]

Mjerenje alata pomoću ticala omogućuje brz i jeftin nadzor loma alata (1), toplinskih deformacija (2) i trošenja alata (3), što je prikazano na slici 29. Mjerenje alata ticalom se može izvršiti s mirujućim ili rotirajućim alatom. Alati kao što su svrdla ili alati za urezivanje navoja mjere se s mirujućim načinom, dok se alati s jednom ili više oštrica (glodala, glodaće glave, dvorezne glave, itd.) mjere s rotirajućim alatom kako bi se dobila točna dimenzija po radijusu.



**Slika 30. Mjerenje alata s mirujućim i rotirajućim alatom [22]**



**Slika 31. Beskontaktno mjerenje alata na NU alatnom stroju pomoću lasera [21]**

Beskontaktno mjerenje alata pomoću lasera također omogućuje brzo i precizno mjerenje, te kontrolu loma alata. Beskontaktnim mjerenjem laserom postiže se veća preciznost mjerenja od mjerenja ticalom, dok kod mjerenja ticalom ne dolazi do greške prilikom kapljica SHIP-a na reznoj oštrici alata. Zbog toga laserski sustav za mjerenje alata ima ugrađene mlaznice za ispuhivanje odvojene čestice i SHIP-a s rezne oštrice prije mjerenja.

Kontrola loma alata uvelike povećava sigurnost u automatskom radu stroja bez operatera. Kontrola alata se vrši nakon završetka operacije, te se alat na kojem se otkrije oštećenje zamjenjuje sa sestrinskim alatom ili se zaustavlja proces.

Prednamještanjem alata na specijalnim uređajima za prednamještanje (Slika 32) također se postiže velika preciznost i točnost, uz velike uštede vremena jer stroj radi dok se vrši prednamještanje alata. Funkcioniraju na beskontaktnom principu. Noviji uređaji mogu mjeriti

automatski, pri čemu obradom slike prepoznaju oblik i geometriju alata, a zatim se pozicioniraju na vrh oštrice i očitavaju dimenzije alata.



**Slika 32. Uređaj za prednamještanje alata tvrtke Zoller [20]**

Tvrtka Zoller je razvila uređaj s integriranim mjernim sustavom, indukcijskim grijačem i sustavom za hlađenje (Slika 32). Takav uređaj omogućuje još brže prednamještanje jer se na jednom uređaju vrši zagrijavanje termo-prihvata, umetanje alata na točnu dimenziju, hlađenje i mjerenje.

Razvojem sustava za prijenos podataka s uređaja za prednamještanje alata u upravljačku jedinicu alatnih strojeva sprečavaju se ljudske pogreške prilikom ručnog unosa podataka, a samim time otklanja rizik sudara i oštećenja stroja ili obratka. Postoje nekoliko načina za prijenos mjernih podataka u upravljačku jedinicu, a sve zahtijevaju označavanje alata odnosno kodiranje prihвата. Prihvati mogu imati ugravirani QR kod ili ugrađeni čip pomoću kojega se izmjereni podaci o alatu zapisuju u sustav i jednoznačno pridjeljuju alatu. Upravo to eliminira svaku mogućnost pogreške upisa krivih dimenzija ili postavljanje krivog alata. Podaci se automatski upisuju u upravljačku jedinicu nakon skeniranja QR koda ili očitavanja čipa, za što je potrebno postaviti čitač na ulaz u spremište alata. U današnjim proizvodnim sustavima postoji mnogo rješenja za siguran i brz prijenos podataka s uređaja za prednamještanje na stroj, stoga je moguće podatke direktno zapisati u upravljačku jedinicu pomoću postprocesora putem DNC mreže. [20]

Prednosti automatskog prijenosa podataka prednamještanja alata u upravljačku jedinicu [20]:

- Velika ušteda vremena
- Eliminacija grešaka prilikom ručnog unošenja podataka
- Bolje praćenje stanja alata
- Automatizacija procesa prednamještanja

Iako ovakav način prednamještanja alata ima brojne prednosti ne može detektirati oštećenje ili lom alata tijekom obrade. Iz tog razloga se instaliraju oba sustava kako bi se ostvarila automatizacija i fleksibilnost procesa.

### 2.2.6. Koordinatni mjerni uređaji

Tradicionalni mjerni uređaji mogu poslužiti kao odlično rješenje kod mjernih karakteristika kao što su duljina, visina, unutarnji ili vanjski promjer, kružnost, ravnost, itd. Problem s tradicionalnim mjernim tehnikama nastaje jer uglavnom svaka mjerna karakteristika zahtjeva poseban mjerni uređaj i ponovno postavljanje pri čemu mogućnost ljudske pogreške drastično raste. Porastom kompleksnosti proizvoda i većih zahtjeva za kvalitetom javlja se potreba za novim mjernim uređajima i metodama. Taj problem se riješio pojavom koordinatnih mjernih uređaja (eng. Coordinate-measuring machine, CMM) koji omogućuju precizna mjerenja mnogo kompleksnijih komada. Preciznost ovisi o kvaliteti izrade uređaja i o uvjetima mjerenja pri čemu se najviše ističe utjecaj temperature i vibracija. Najčešće su izvedeni kao uređaji troosne mehaničke strukture opremljeni mjernim sustavom (npr. ticalom) i pripadajućim softverom za prikupljanje mjernih podataka. Postoje horizontalni i vertikalni koordinatni mjerni uređaji, prikazani na slici 33. Vertikalna izvedba se odnosi na modele s pomičnim mostom, dok horizontalna izvedba ima krak. Radni stol se najčešće izrađuje od fino brušenog granita [7].



**Slika 33. Koordinatni mjerni uređaj: horizontalni (lijevo) i vertikalni (desno) [23],[24]**

Implementacija softvera kod koordinatnih mjernih uređaja omogućuje programiranje te manualni odabir pozicije i karakteristike mjerenja što uvelike povećava fleksibilnost i

praktičnost ovakvih sustava. CMM funkcionira na osnovu fizičkog dodira ticala i komada, pri čemu se ticalo dovede u potrebnu poziciju, napravi kontakt s komadom i vrati se u početnu poziciju. Taj se postupak ponavlja ovisno koliko je mjernih točaka odabrano. Kontrolno računalo prikuplja i zapisuje te podatke, a zatim prikazuje u mjernom izvještaju. Mjerni izvještaj može biti u digitalnom (npr. excel tablica ili u PDF formatu ) ili tiskanom obliku.

```

DIM DUZINA= 2D DISTANCE FROM POINT PNT8 TO POINT F1 PAR TO   XA
              TS=MM
AX   MEAS   NOMINAL   DEV   +TOL   -TOL   OUTTOL
M   218.723 218.100   0.623  1.000   0.000   0.000 #

DIM VRAT= 2D DISTANCE FROM POINT PNT6 TO POINT PNT10 PAR TO   Y
              ITS=MM
AX   MEAS   NOMINAL   DEV   +TOL   -TOL   OUTTOL
M    7.675   7.720  -0.045  0.000  -0.050   0.000 #

DIM VRAT POZICIJA= LOCATION OF POINT PNT11 UNITS=MM
AX   MEAS   NOMINAL   DEV   +TOL   -TOL   OUTTOL
Y   -0.054   0.000  -0.054  0.020  -0.020   0.034 <

DIM SIRINA_OTRAGA= 2D DISTANCE FROM POINT PNT12 TO POINT PNT13
                   RADIUS UNITS=MM
AX   MEAS   NOMINAL   DEV   +TOL   -TOL   OUTTOL
M   19.181  19.150   0.031  0.020  -0.020   0.011 >

DIM DIM_2= LOCATION OF POINT PNT12 UNITS=MM
AX   MEAS   NOMINAL   DEV   +TOL   -TOL   OUTTOL
Y    9.546   9.575  -0.029  0.020  -0.020   0.009 <

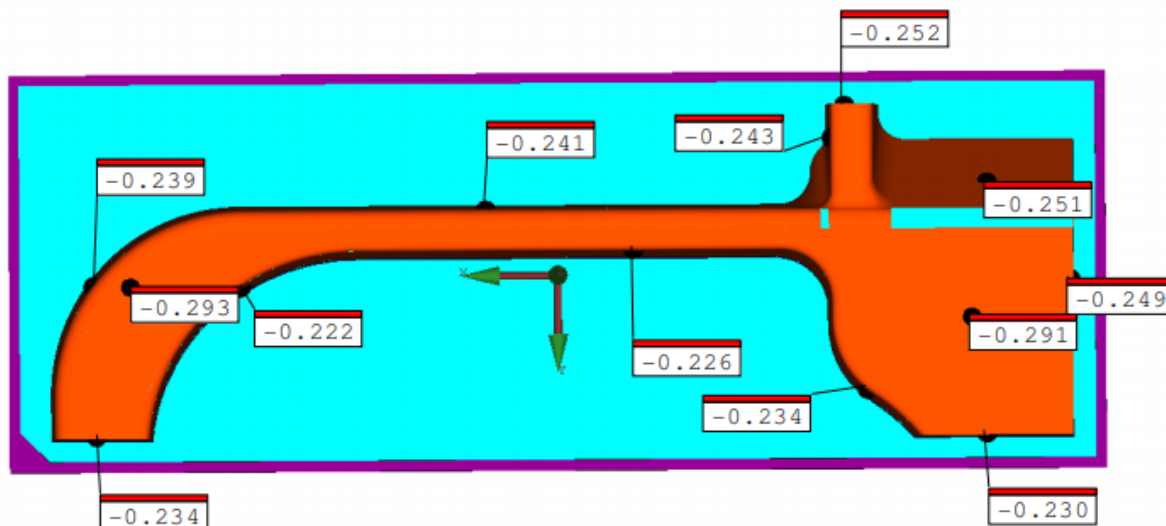
```

### Slika 34. Ispis mjernih podataka s CMM uređaja

Na slici 34 su prikazani mjerni podaci nekoliko karakterističnih točaka komada. Crveno označene vrijednosti govore da postoje odstupanja, odnosno neke dimenzije nisu unutar zadanog tolerancijskog polja.

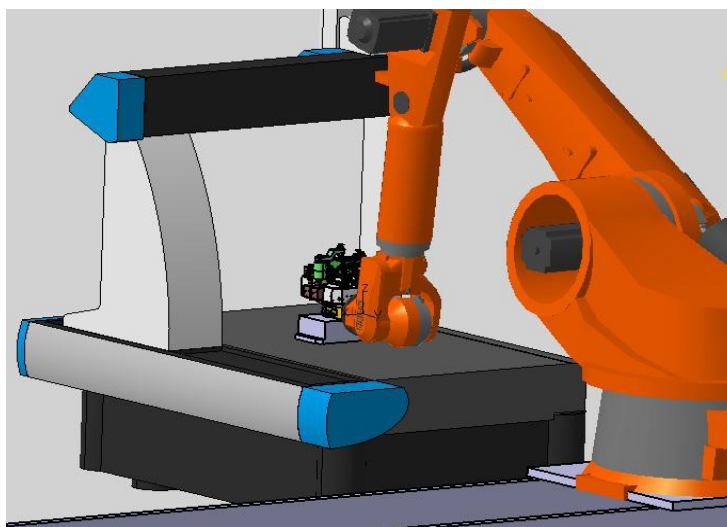
Velika prednost se postiže programiranjem koordinatnih mjernih uređaja pomoću CAD modela što uvelike olakšava mjerenje najkompleksnijih komada. Postupak je jako jednostavan, potrebno je uvesti CAD model u softver i samo kliknuti na bilo koju točku na površini modela. Ovaj način programiranja ne zahtjeva korištenje mjernog uređaja za postupak programiranja, odnosno programiranje se može obaviti na bilo kojem računalu, samim time uređaj može slobodno mjeriti komade dok se pripremaju novi programi za njegov rad. Izmjerene vrijednosti mjerenja se zapisuju te označavaju konkretna odstupanja od idealnog 3D modela, što je prikazano na slici 35, na primjeru mjerenja EDM elektroda na CMM.





**Slika 35. Primjer mjernog izvještaja s mjerenja EDM elektrode**

Programiranje i mogućnost automatskog rada koordinatnih mjernih uređaja omogućuje primjenu i u fleksibilnim obradnim sustavima, čime se postiže automatsko postavljanje komada i kontrola svih toleriranih dimenzija. Podaci mjerenja se šalju na CMM računalu koje je povezano s glavnim računalom FMS-a.



**Slika 36. Primjer postavljanja komada na CMM pomoću robota [1]**

Prije kontrole gotovih komada potrebno je isprati moguće odvojene čestice i isušiti preostali SHIP na stanicama za ispiranje i isušivanje. Svaki komad zahtijeva posebni program za mjerenje, stoga se identifikacijom palete i komada automatski preuzima potrebni program s glavnog računala FMS-a na CMM računalu. Podatci se automatski uspoređuju s prethodno zadanim tolerancijama oblika i položaja. Ako postoje neka odstupanja izvan tolerancija komad se šalje na stanicu za pregled, nakon vizualnog pregleda komad se ponovno šalje na mjerni

uređaj, ponavlja se proces s istim programom te ako opet postoje odstupanja bilježe se u prateći mjerni izvještaj komada [7].

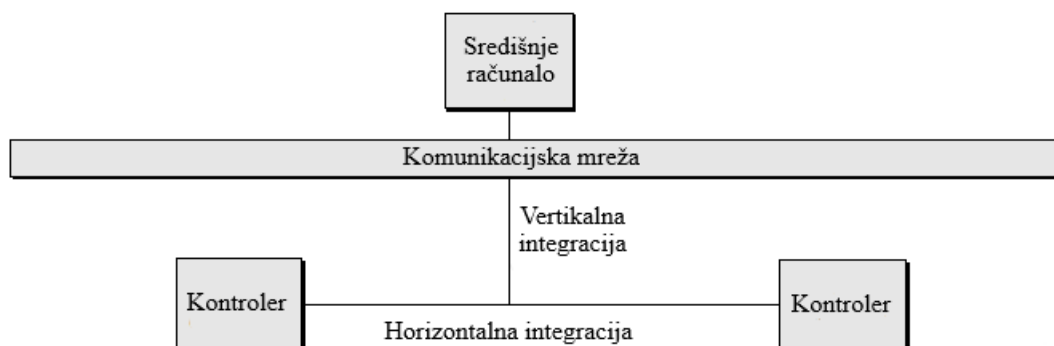
Prednosti koordinatnih mjernih uređaja [7]:

- Skraćuju vrijeme kontrole
- Visoka fleksibilnost
- Eliminiraju ljudske greške
- Veća točnost i preciznost od tradicionalnih mjernih metoda
- Uklanja se potreba za više postavljanja

### 2.2.7. *Hardverska i softverska rješenja u FMS*

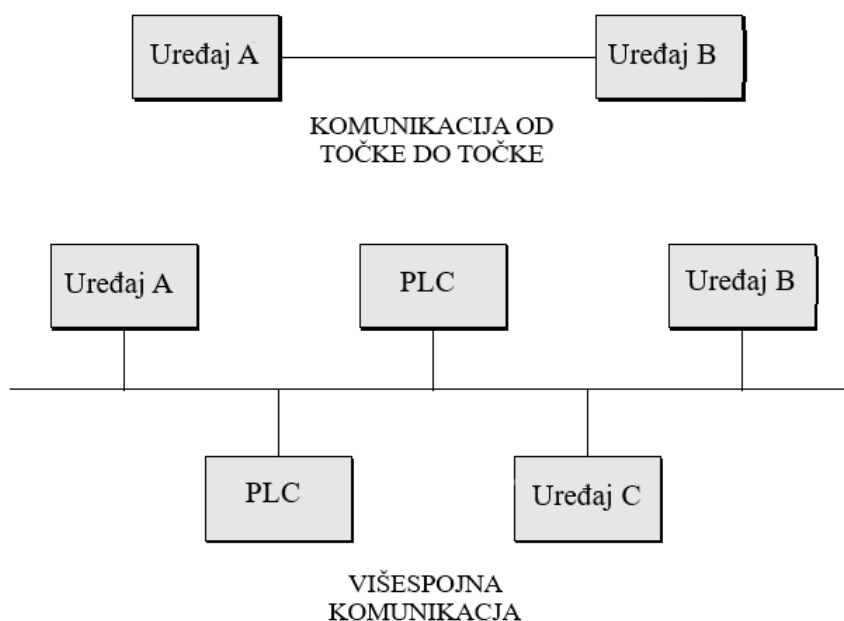
Digitalizacija proizvodnih sustava utječe na sve brojniju implementaciju kako softverskih tako i neophodnih hardverskih rješenja. U fleksibilnom proizvodnom sustavu su svi elementi međusobno povezani i mogu izmjenjivati podatke na razne načine putem komunikacijskih veza. FMS računalni hardver je vidljivi dio instalirane računalne opreme u sustavu, a uključuje središnje računalo, s njim povezanu perifernu opremu, programabilne logičke kontrolere (PLC) i rezervno računalo u nekim slučajevima. Međutim za funkcioniranje računala potrebno je osigurati pravi softveri, kompetentno i obučeno osoblje te stalnu podršku kako bi cijeli sustav radio na prihvatljivim razinama.

Integracijom PLC-a i raznih kontrolera vrši se upravljanjem sustavom. Također je jako bitna njihova horizontalna i vertikalna integracija. To otvara mogućnost komunikacije između istih razina sustava (npr. između dva ili više kontrolera, između ćelija) ili komunikacija kontrolera s nekom višom razinom sustava (npr. sa središnjim računalom) [7].



Slika 37. Horizontalna i vertikalna integracija [7]

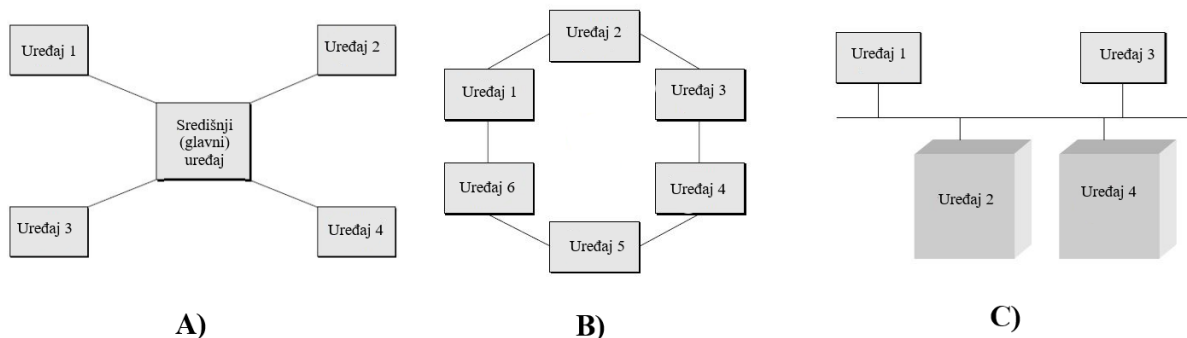
Komunikacijske veze su ključne za ostvarenje automatiziranog proizvodnog sustava. Mreža je postavljena tako da omogući komunikaciju svim elementima koji to zahtijevaju. Takva mreža se naziva lokalna mreža (LAN). Može biti ograničena na jednu prostoriju, zgradu, automatizirani sustav ili niz usko povezanih sustava. Dva najčešća oblika komunikacije između uređaja su od točke do točke (eng. point-to-point) i više spojna veza (eng. multidrop). Komunikacija od točke do točke se koristi za jako jednostavne mreže i direktno povezuje dva uređaja. Više spojna veza se koristi istim komunikacijskim sredstvom i mogu ga dijeliti više uređaja pojedinačno ili istovremeno [7].



**Slika 38. Od točke do točke i više spojna komunikacija [7]**

Mreže se obično dijele na tri tipa topologije (Slika 39) [7]:

- Zvezdasta topologija (A)
- Linearna topologija ili sabirnica (B)
- Prstenasta topologija (C)



**Slika 39. Tipovi topografije mreže [7]**



U automatiziranim sustavima osim standardnih postoje i hibridne topologije koje predstavljaju kombinaciju gore navedenih topologija. Njihovom primjenom se nastoje izbjeći ograničenja standardnih topologija.

Uz svu hardversku podršku i komunikacijske veze potrebno je integrirati razne softvere koji omogućuju digitalizaciju, autonomnost i fleksibilnost proizvodnog sustava. Softveri su fizički nevidljivi dio FMS-a ali upravo oni povezuju i pokreću cijeli sustav. Treba razlikovati softvere koji su potrebni direktno na središnjem upravljačkom računalu FMS-a i ostale softvere. [7]Pojavom raznih CAD i CAM softvera povećava se produktivnost i učinkovitost. Njihova integracija i međusobna komunikacija postaje usko grlo ka daljnjem povećanju učinkovitosti suvremenih proizvodnih sustava [25].

Primjena računala u proizvodnji [25]:

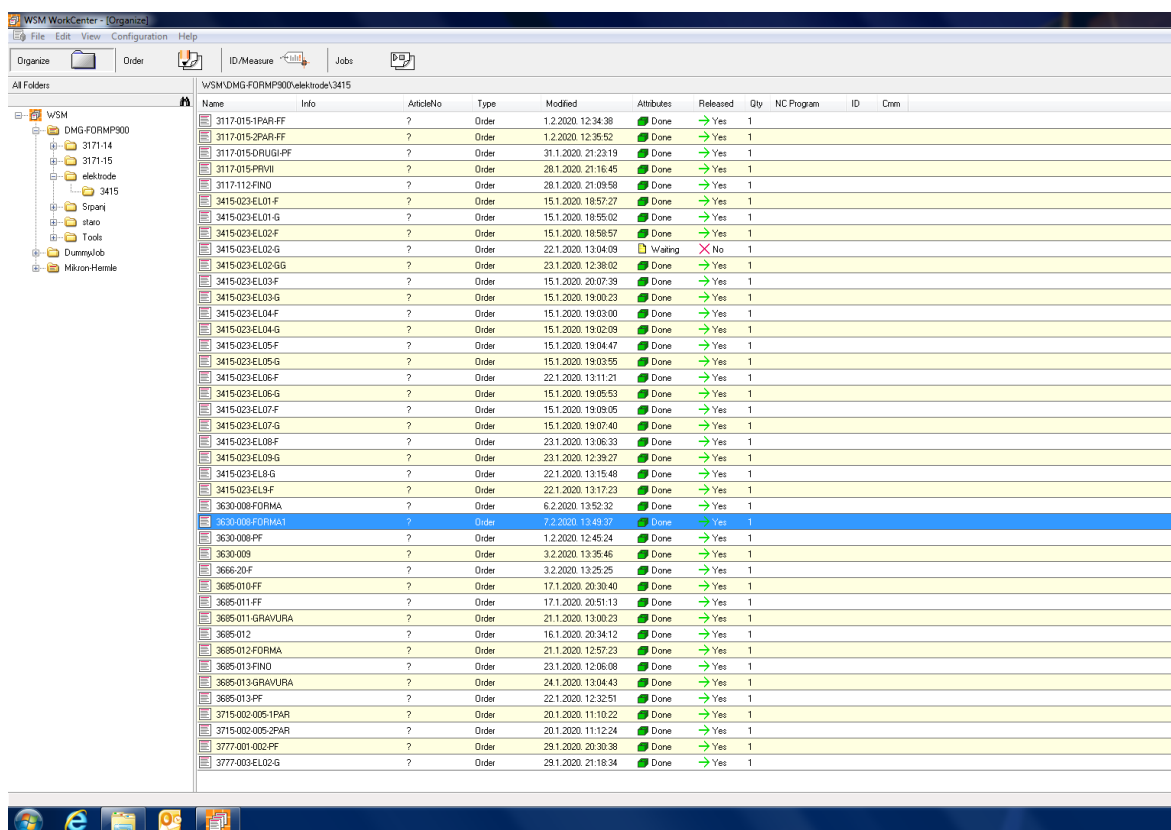
- **Konstruiranje pomoću računala** (eng. Computer aided design, CAD) se počelo razvijati sredinom prošlog stoljeća. Najprije su to bili jednostavni alati za crtanje 2D modela koji se razvijaju u današnje softvere za konstruiranje 3D modela i izradu tehničke dokumentacije. Neki od najpoznatijih CAD softvera su CATIA, SolidWorks, Creo, NX, itd.
- **Proizvodnja pomoću računala** (eng. Computer aided manufacturing, CAM) se također razvija sredinom prošlog stoljeća s ciljem programiranja NC strojeva. Označava oblik automatizacije u kojem se informacije i naredbe predaju izravno s računala. Prve verzije su mogle upravljati s NC strojevima uz pomoć kodiranih naredbi zapisanih na bušenoj vrpici, dok današnja računala upravljaju s cijelim sustavima. Programi sadrže sve parametre obrade, putanje alata, rezne alate, a izrađuju ih tehnolozi. Također postoji mogućnost simuliranja procesa obrade i provjere kolizija. Omogućuje se brzo i jednostavno reprogramiranje sustava, primjena konstrukcijskih promjena i uvođenje novih proizvoda. Neki od najpoznatijih CAM softvera su : MasterCAM, hyperMILL, Tebis, ESPRIT, itd.
- **Proizvodnja integrirana računalom** (eng. Computer-integrated manufacturing, CIM) je računalna integracija CAD-a i CAM-a kao i ostalih komponenti proizvodnog sustava. Postiže se potpuno iskorištenje potencijala integriranih softvera. Omogućuje automatizaciji cijelog sustava od projektiranja, planiranja, konstrukcije do izrade proizvoda.

Glavne prednosti koje se postižu integriranjem računala su: postiže se visok stupanj automatizacije i fleksibilnosti, praćenje procesa u stvarnom vremenu, pravovremeno otklanjanje grešaka, upravljanje alatima i bolje planiranje procesa.

Za upravljanje fleksibilnim proizvodnim sustavom obično se koriste softveri od kompanije koja instalira cijeli sustav. Najčešće se sastoji od nekoliko funkcionalnih modula koji međusobno djeluju i upravljaju cijelim sustavom [7].

Zadaće pojedinih modula [7]:

- Preuzimanje NC programa s glavnog računala na upravljačku jedinicu stroja
- Upravljanje transportom i materijalima
- Generiranje radnih naredbi
- Raspored radnih komada
- Simulacije
- Upravljanje alatima



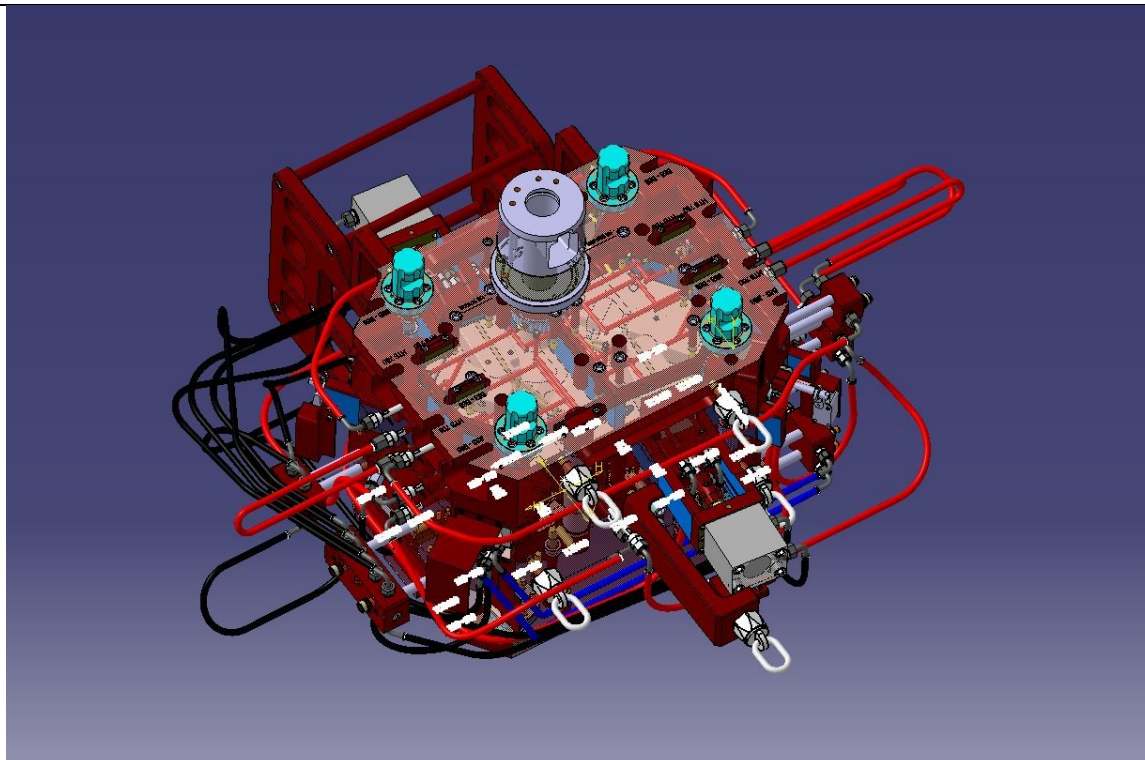
Slika 40. Primjer modula za generiranje i organiziranje radnih naredbi

### **3. INTEGRIRANJE KONVENCIONALNE I NEKONVENCIONALNE OBRADNE ODVAJANJEM U FLEKSIBILNI OBRADNI SUSTAV**

#### **3.1. Uvod**

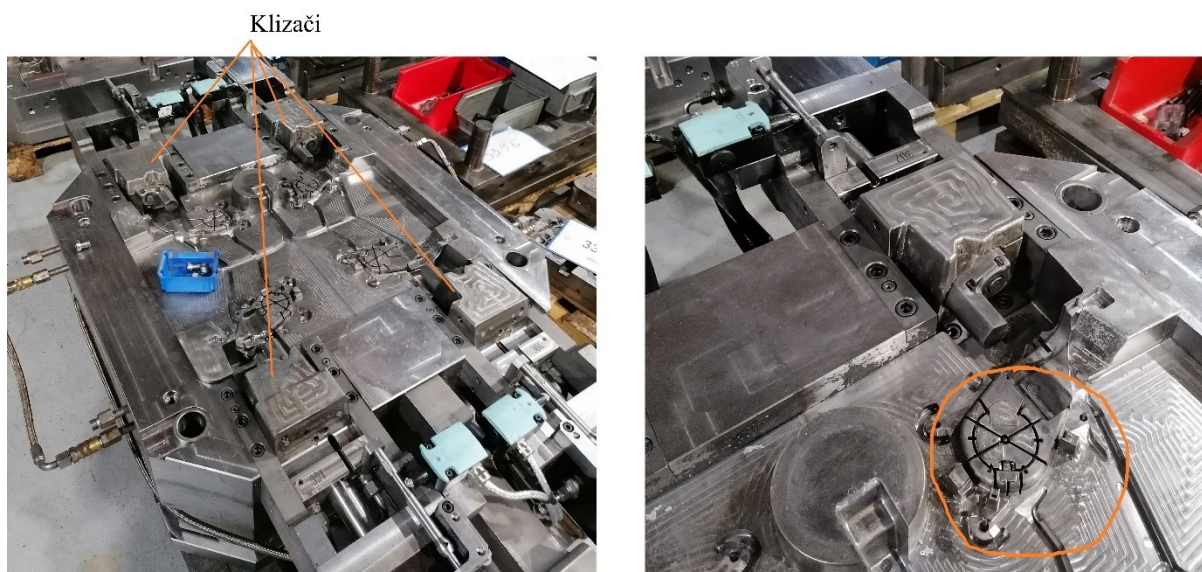
Za implementaciju fleksibilnog obradnog sustava potrebno je ispuniti brojne preduvjete (opisane u poglavlju 2.2.) i povezati sve elemente sustava kao što su NU obradni strojevi, transportna sredstva, stanice za ispiranje, sušenje i cijedenje, CMM te skladište obradaka i alata. Takvi sustavi su jako kompleksni i potrebna su velika početna ulaganja. Ipak zbog svojih brojnih prednosti FMS se danas jako često pronalaze u proizvodnim pogonima. Najčešće izvedbe FMS-a koriste samo jednu tehnologiju obrade (npr. glodanje, tokarenje ili EDM) dok su sustavi s implementacijom više tehnologija u jednom FMS jako rijetki. U ovom poglavlju su opisani svi elementi i pristup gradnji jednog takvog FMS sustavu koji uspješno integrira konvencionalne i nekonvencionalne postupke obrade, konkretno postupak glodanja i elektro-erozije. Upravo takav sustav je realiziran u kompaniji Teh-Cut te je detaljnije opisan u nastavku. Glavna pokretač razvoja ovakvog sustava temelji se na povezanosti i ovisnosti tehnologija elektro-erozije o glodanju. Kao alat kod postupka elektro-erozije koriste se elektrode izrađene najčešće glodanjem isto kao i obradak. Stoga u sustavu je potrebno integrirati glodaču obradnu ćeliju koja ima mogućnost obrade više materijala (obradak od čelika i grafitnu elektrodu) te stroj za elektro-eroziju uz sve ostale potrebne elemente.

Ovakva izvedba FMS-a može imati veliku primjenu u industrijama kao što su alatničarska, automobilska ili elektronička. Realizacija FMS-a prikazana u ovom radu se koristi u alatničarskoj industriji za proizvodnju alata za tlačni lijev aluminijski (Slika 41 i 42). Izrada alata se temelji na zahtjevima svakog pojedinog kupca, odnosno na modelu proizvoda što zahtjeva modificiranje postojećeg ili konstrukciju i izradu potpuno novog alata za svaki proizvod. Karakteristično je da većina dijelova ima jako kompleksnu geometriju uz veliki broj varijanti proizvoda koje najčešće nije moguće izraditi samo tehnologijom glodanja. Iz tog razloga je potrebno integrirati glodanje i EDM kako bi se postigao brz, kvalitetan, produktivan i ekonomičan proizvodni proces.



**Slika 41. Model sklopljenog alata za tlačni ljev aluminija**

Alat za tlačni ljev se sastoji od središnjeg dijela koji zatvara te formira kalupnu šupljinu, kućišta i pomoćnih dijelova. Dijelovi koji zatvaraju i formiraju kalupnu šupljinu su matrice (nepomični dijelovi) i klizači (pomični dijelovi) koji su jako uskih tolerancija te njihova točnost i kvaliteta obrađene površine direktno utječe na kvalitetu odljevka (Slika 42). Zaokruženi dio matrice na slici 42 prikazuje karakterističnu geometriju (uske utore) koja zahtijeva EDM obradu.



**Slika 42. Otvoreni alat za tlačni ljev: označeni klizači (lijevo) i uski utori (desno)**

Temeljni dio svakog proizvodnog sustava je proizvodnja. Proizvodnja je proces pretvaranja sirovog materijala u funkcionalni proizvod kojemu se dodaje vrijednost. U širem smislu proizvodnja obuhvaća cijeli životni ciklus proizvoda od konstruiranja, izrade, popravaka do zbrinjavanja proizvoda. Značajan udio proizvoda zahtjeva obradu nekim od postupaka obrade odvajanjem čestica, pri čemu odvajanjem materijala dodajemo vrijednost proizvodu. Tehnologije obrade odvajanjem čestica su često najbolji način za obradu nekih površina, a ponekad i jedini način [26].

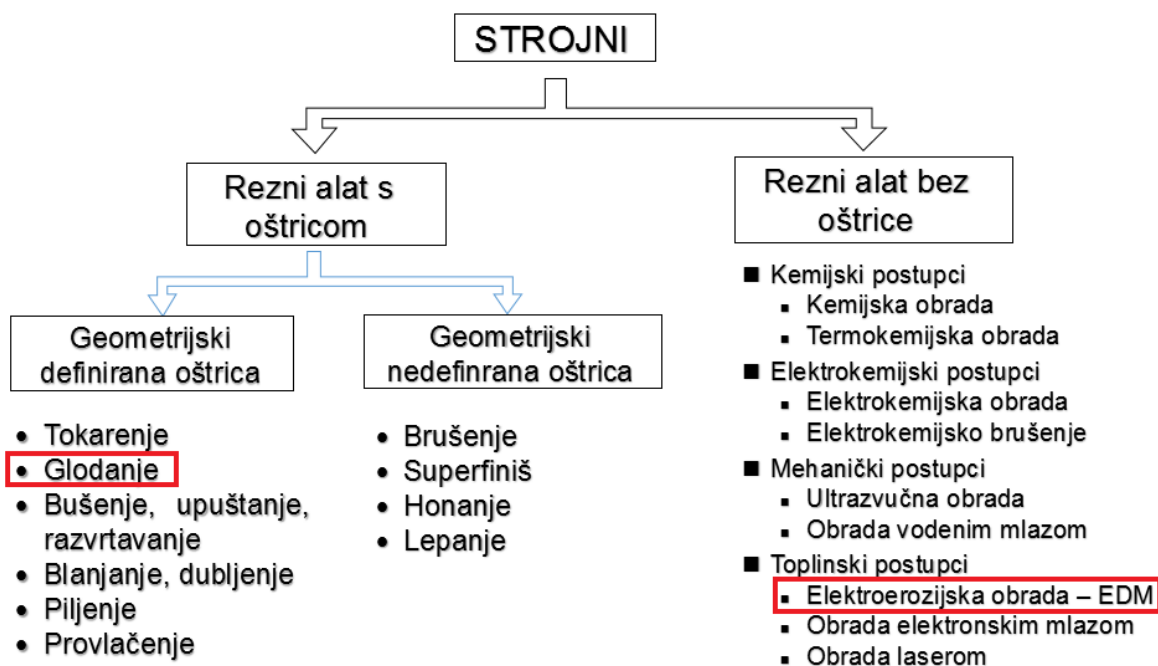
Prednosti obrade odvajanjem čestica [26]:

- Omogućuje se postizanje točnosti i uskih tolerancija uz dobru kvalitetu obrađene površine
- Najbolji i jedini način za formiranje oštih rubova, ravnih površina te raznih profila
- Mogu se obrađivati gotovo svi materijali
- Velika fleksibilnost kod obrade kompleksnih komada raznih dimenzija
- Moguće je automatizirati proizvodnju

Nedostaci obrade odvajanjem čestica [26]:

- Generira odvojene čestice
- Zahtjeva skupu opremu i strojeve
- Često je potrebno primijeniti više strojeva za izradu jednog proizvoda
- Strojevi i rukovanje alatima zahtjeva velik prostor
- Velik udio pomoćnih vremena (smanjuje se implementacijom FMS-a)

Obrada odvajanjem se dijeli na ručne i strojne postupke obrade koji se mogu izvoditi reznim alatima s oštricom ili bez oštrice (Slika 43). Konvencionalni postupci koriste rezni alat s oštricom dok nekonvencionalni bez oštrice. U ovom radu se razmatraju strojni postupci, a posebna pozornost je dana tehnologijama glodanja i elektro-erozijske obrade (EDM).



Slika 43. Podjela strojnih postupaka obrade odvajanjem [26]

Rezni alati odvajaju materijal na temelju veće tvrdoće od obrađivanog komada. Obrada reznim alatima s oštricom nosi svoje probleme kao što su trošenje, zatupljivanje i lom rezne oštrice, također razvojem novih materijala raste tvrdoća što dodatno otežava obradu konvencionalnim metodama. Porastom tvrdoće, kompleksnosti proizvoda i zahtjeva za visokom kvalitetom površine javlja se potreba obrade s novim metodama, novim reznim alatima pa čak i naprednim nekonvencionalnim postupcima. Stoga se danas često kombiniraju postupci obrade s ciljem povećanja produktivnosti, kvalitete obrađene površine uz eliminiranje ograničenja pojedinih tehnologija.

### 3.2. Glodanje

Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica uglavnom prizmatičnih komada, a izvodi se na alatnim strojevima koji se nazivaju glodalice ili glodači obradni centri. Glavno gibanje je kružno kontinuirano i vrši ga alat dok je posmično proizvoljnog oblika i vrši ga obradak (ili glavno vreteno). Alat je glodalo i ima definiranu geometriju reznog dijela s više oštrica raspoređenih po zubima. Nekoliko reznih oštrica je istovremeno u zahvatu i dinamički su opterećene zbog stalnog ulaska i izlaska iz zahvata te zbog promjenjivog presjeka odvojene čestice tijekom zahvata [26]. Stoga je jako bitno znanje i iskustvo prilikom odabira strategije, parametara obrade i načina stezanja komada. U današnjim proizvodnim sustavima se uglavnom koriste moderni i precizni 5-osni obradni centri koji omogućuju obradu kompleksnijih komada



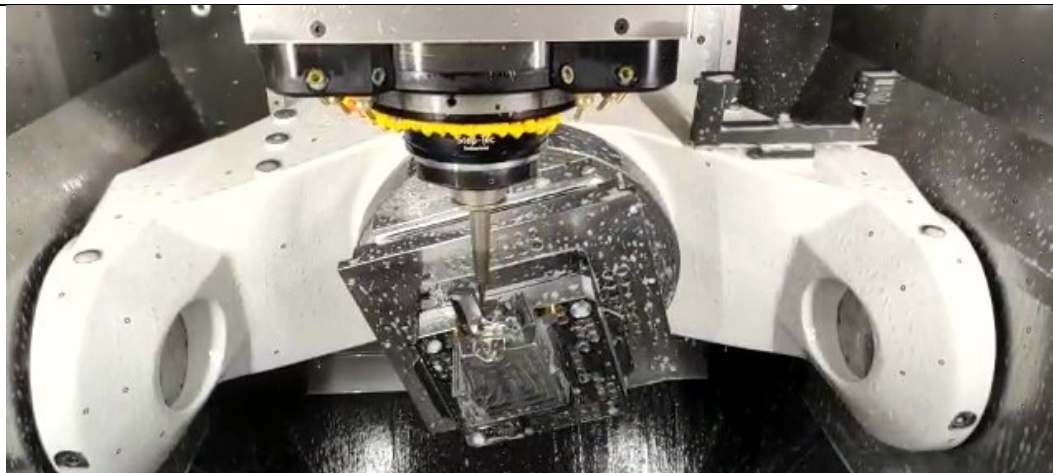
u manje stezanja te uz mnogo veće posmake i brzine (Slika 44). Zbog lakšeg pristupa zoni obrade mogu se koristiti kraći a ujedno i stabilniji alati, čime se povećava životni vijek alata i kvaliteta obrađene površine.



**Slika 44. 5-osni glodači obradni centar DMG Mori HSC 55 Linear**

Podjele glodanja po raznim kriterijima [26] :

- Prema postignutoj kvaliteti obrađene površine:
  - Grubo
  - Fino
  - Završno
- Prema kinematici postupka:
  - Istosmjerno
  - Protusmjerno
- Prema položaju reznih oštrica:
  - Obodno
  - Čeono
- Prema obliku obrađene površine:
  - Ravno (plansko)
  - Okretno (okruglo i ne okruglo)
  - Profilno (glodanje raznih utora i zupčanika)
  - Odvalno (glodanje zupčanika)
  - Oblikovno (kopirno ili CNC)



**Slika 45. Simultano kopirno glodanje na 5-osnom obradnom centru**

Na slici 45 je prikazao kopirno glodanje komada stegnutog na paletni sustav uz pomoć FCS prstena za pozicioniranje i vijaka čime je omogućen pristup komadu sa svih strana i iskorištenje punog potencijala 5-osnog obradnog centra.

Odabir parametara obrade je završni dio procesa planiranja proizvodnje. Nakon odabira redoslijeda operacija i izbora strojeva dostupne su sve informacije potrebne za odabir parametar. Izbor se temelji na nekoliko kriterija a to su: materijal obratka, materijal reznog alata, dimenzije alata, snaga stroja, željena kvaliteta obrađene površine, itd. Bitno je naglasiti da se ispravnim odabirom parametara obrade ostvaruje najveća produktivnost ili najveća ekonomičnost [27].

1) Dubina rezanja je parametar koji je usko povezan s dodatkom za obradu iz prethodnih tehnologija. Danas su dodatci za obradu sve manji te se teži obradi u jednom prolazu, stoga je potrebno u prethodnim tehnologijama dobiti skoro konačan oblik (eng. Near net shape). Ipak zbog deformacije obratka tijekom kaljenja poželjan je dodatak za obradu koji najčešće iznosi od 0,5 do 1 mm [27].

Odabir dubine rezanja se odabire na temelju [27]:

- Snage stroja
  - Krutosti sustava stezanja i vibracija
  - Geometrije alata (duljina rezne oštrice i radijusa)
- 2) Brzina rezanja je najutjecajniji parametar obrade i kod glodanja označava vrijednost obodne brzine alata. Odabire se iz kataloga alata s obzirom na materijal obratka i izabrani alat. Pravi odabir brzine alata sprječava oštećenje i lom alata, pregrijavanje obratka ili do



promjene površinske mikrostrukture. Nakon odabira brzine rezanja analogno se računa broj okretaja glavnog vretena prema izrazu (3.2) [27].

$$v_c = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{1000} \quad (3.1)$$

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{d \cdot \pi} \quad (3.2)$$

Pri čemu su:

$v_c$  – brzina rezanja [m/min]

$n$  – broj okretaja glavnog vretena (alata) [ $\text{min}^{-1}$ ]

$d$  – promjer alata [mm]

3) Posmak označava put koji alat ili obradak prijeđe za jedan okretaj glavnog vretena. Pri određivanju posmaka glavnu ulogu ima faza obrade jer se uvelike razlikuje posmak tijekom grube obrade u odnosu na završnu obradu. Grubom obradom se nastoji što efikasnije ukloniti višak materijala te je posmak veći nego kod završne obrade, ali treba voditi računa o snazi stroja, izdrživosti alata i krutosti sustava. Brzina posmaka se računa prema izrazu 3.3, dok se posmak računa prema izrazu 3.4.

$$v_f = f \cdot n \quad (3.3)$$

$$f = f_z \cdot z_c \quad (3.4)$$

Pri čemu su:

$v_f$  – posmična posmaka [mm/min]

$f$  – posmak [mm]

$f_z$  – posmak po reznoj oštrici [mm]

$z_c$  – broj reznih oštrica [mm]

Osim posmaka, brzine i dubine rezanja bitni su snaga i moment koje stroj može predati alatu. To je često ograničavajući faktor kod odabira dubine rezanja ili tijekom zahtjevnih obrada pri kojima dolazi do mnogo vibracija, a često i do oštećenja alata.

### 3.2.1. Stezanje obradaka

Tradicionalni način stezanja pomoću raznih steznih naprava i elemenata postaje nepraktičan u fleksibilnoj i automatiziranoj proizvodnji. Potrebno je omogućiti brzo, jednostavno i točno stezanje te pozicioniranje obradaka. Korištenjem paletnog sustava s definiranom nul-točkom uz razne modularne elemente za stezanje i pozicioniranje se postiže puni potencijal takvih sustava. Paleta imaju standardizirani raster konusnih provrta s ugraviranim oznakama. U provrte se umeću prsteni za pozicioniranje kroz koje su ujedno i steže komad, obično pomoću vijaka. Prsten se sastoji od dva dijela, konusnog koji se umeće u paletu i cilindričnog dijela koji se umeće u tolerirani provrt na komadu (Slika 46). Također postoje elementi za pozicioniranje i podizanje komada od palete kako bi se omogućio što lakši pristup zoni obrade, a ujedno i manje stezanja. Za to se koriste kubusi, stupići i elementi sa standardiziranim konusima pomoću kojih se također zadržava pozicija kao i na paleti (Slika 47). Za točno pozicioniranje obratka potrebno je u prethodnom stezanju napraviti usko tolerirani provrt koji zadržava prsten u poziciji.



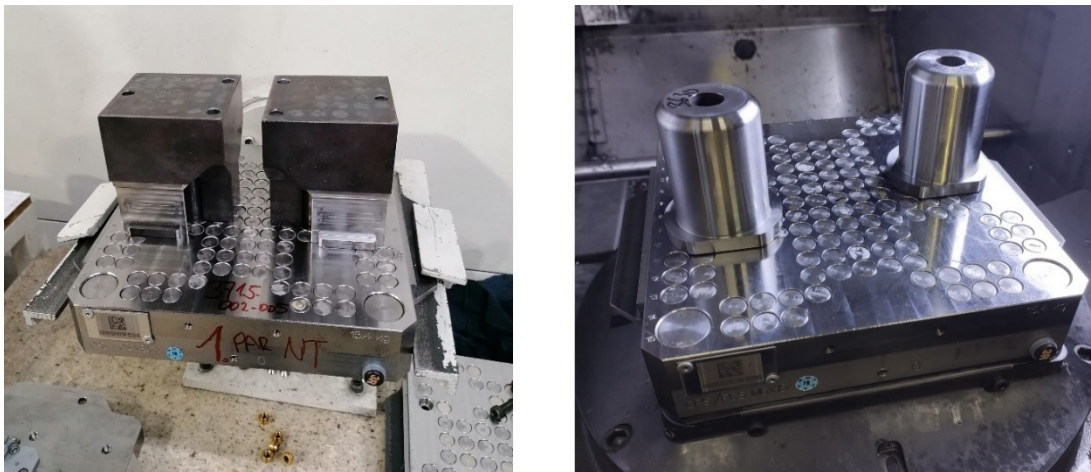
Slika 46. Prsteni za stezanje i pozicioniranje



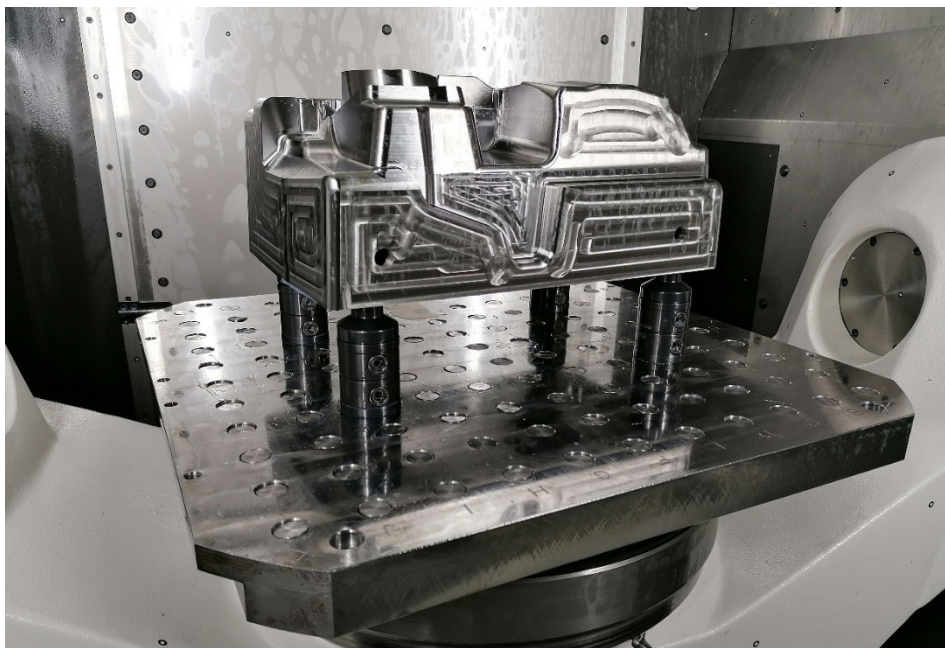
Slika 47. Kubus

Korištenje ovakvog sustava donosi niz prednosti:

- Pristup obratku sa svih strana (potpuno iskorištenje prednosti 5-onih obradnih sustava i manji broj stezanja)
- Smanjena mogućnost pogreške zbog krive pozicije nul-točke (uvijek ista nul-točka)
- Povećana točnost
- Tradicionalne stezne naprave se više ne koriste (škripac, podloške)
- Kraće vrijeme stezanja komada
- Nul-točka uvijek ostaje ista što olakšava dorade ili prijenos na drugi stoj (npr. stroj za EDM)
- Može se stegnuti više komada na paletu



Slika 48. Stezanje više komada na paleti



Slika 49. Kombinacija paletnog sustava i modularnog stezanja

### 3.2.2. Rezni alati

Izborom odgovarajućeg reznog alata postiže se optimalna obrada. Alate je potrebno izabrati ovisno o materijalu, prevlaci, geometriji odnosno funkcionalnosti samog alata. Također odabir alata je usko povezan s produktivnošću procesa proizvodnje, pri čemu pravim izborom alata i parametara obrade produktivnost može znatno narasti.

Zahtjevi koji se postavljaju na rezni dio alata su [26]:

- Tvrdća i čvrstoća
- Žilavost
- Čvrstoća reznog brida
- Unutrašnja razina strukture
- Temperaturna izdržljivost i oksidacijska postojanost
- Nije podložan difuziji i stvaranju naljepak

Tvrdća i žilavost se međusobno isključuju te je jako teško postići oba svojstva istovremeno, stoga se većina današnjih alata prevlači. Prevlaka ima ulogu u povećanju otpornosti na trošenje te omogućuje veće brzine rezanja, veći posmak, veću postojanost rezne oštrice i bolju kvalitetu obrađene površine.

Materijali reznih alata [26]:

- Brzorezni čelici koji imaju jako dobru žilavost te se lako izrađuju i bruse, ali imaju nisku tvrdoću.
- Tvrdi metali su sinterirani materijali koji se sastoje od praša metalnih karbida te kobalta, nikla ili molibdena kao veziva. Danas se najčešće koriste prevučeni alati od tvrdog metala.
- Keramika koja može biti oksidna, miješana i ne oksidna. Karakterizira je niska žilavost i visoka tvrdoća.
- Dijamant je čisti ugljik i smatra ga se najtvrđim reznim materijalom. Ima jako malu žilavost ali je najotporniji prema trošenju. Primjenjuje se za obradu obojenih metala i kompozitnih materijala, ali zbog relativno male temperaturne postojanosti nije pogodan za obradu kaljenih čelika.
- Cermet koji se keramičkih komponenti uloženi u metano vezivo.
- CBN (kubični bor-nitrid) koji se drugi najtvrđi rezni materijal. Primjenjuje se za tvrdu obradu čelika.



Najčešće varijante alata za glodanje su: glodala s neizmjenjivim reznim oštricama, glodala s izmjenjivim reznim oštricama i glodaće glave. Glodala s neizmjenjivim reznim oštricama su najčešće od tvrdog metala ili brzoreznog čelika i pri tome monolitni (cijeli alat od istog materijala). Ostali alati imaju dršku (prihvat) od jednog materijala na koji se pričvršćuje pločica s reznom oštricom. Najčešće se koriste pločice od prevučenog tvrdog metala.



Slika 50. Rezni alati za glodanje [10]

### 3.2.3. Prihvati reznih alata

Spoj reznog alata s glavnim vretenom se ostvaruje raznim vrstama prihvata. Cilj prihvata je ostvariti krut i točan spoj za prijenos snage i momenta s glavnog vretena na alat. Najčešće se koriste ISO-SK (SK) i HSK prihvati. Izbor vrste prihvata ovisi o sustavu za stezanje prihvata u glavnom vretenu. SK prihvati snagu i moment prenose preko pritiska na konusnoj površini. Pritisak ovisi o sili stezanja čeljusti koje stežu prihvat s vanjske strane. To je nepovoljno za visokobrzinsku obradu jer centrifugalna sila širi čeljusti. Zbog toga kod HSK držača čeljusti za stezanje prihvaćaju držač iznutra. Tada uslijed visokobrzinske obrade centrifugalna sila pozitivno djeluje na stezne čeljusti odnosno silu stezanja. Prijenos sile i momenta se ostvaruje pomoću konusa i čeonom površinom što povećava krutost zbog ravnog nalijeganja. Imaju manju masu nego SK držači [19].



Slika 51. Nekoliko vrsta HSK prihvata alata

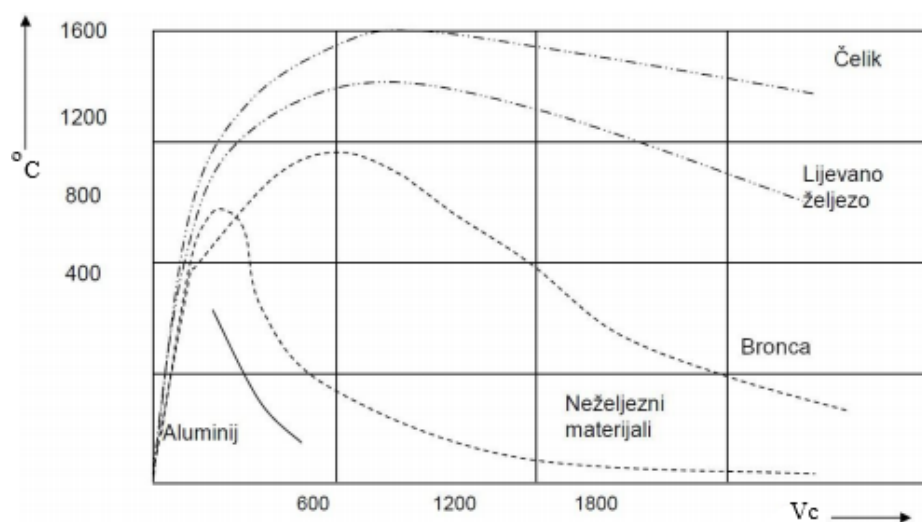
Vrste prihvata alata :

- Termo prihvat
- Prihvati sa steznim čahurama
- Hidraulički prihvat
- Weldon prihvat

U proizvodnji se uglavnom koriste sve vrste prihvata, dok su najčešći termo prihvat. Oni osiguravaju odličnu točnost i preciznost te su pogodni za visokobrzinske obrade.

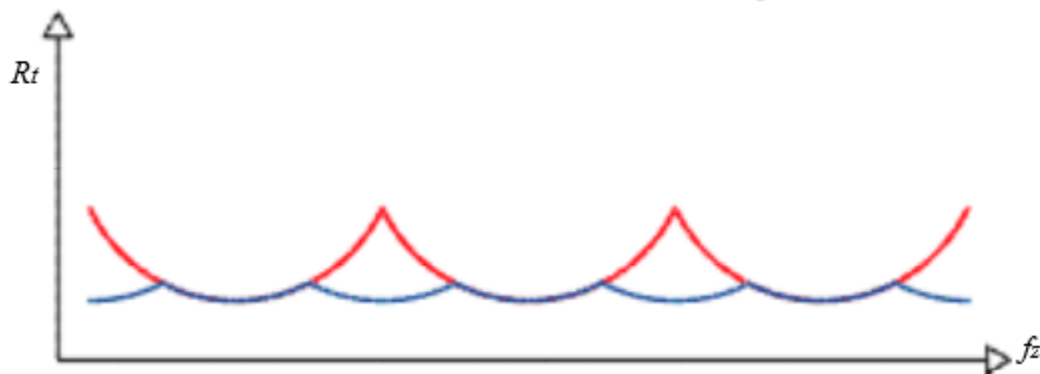
### 3.2.4. Visokobrzinska obrada

Visokobrzinska obrada (eng. High speed machining, HSM) je poznata jako dugo, dok je svoju primjenu i ekonomske učinke pokazala tek u posljednjih deset do petnaest godina. Kriterij za određivanje da li je neka obrada visokobrzinska ili ne nije jednoznačan. HSM se smatra svaka obrada s 5 do 10 puta većom brzinom rezanja od tradicionalne obrade, također se opisuje kao obrada s velikim frekvencijama vrtnje (broj okretaja), velikim posmacima ili obrada s velikim učinkom (veliki volumen odvojene čestice u jedinici vremena). Brzina s kojom počinje HSM područje obrade također nije strogo definirana i uvelike ovisi o vrsti materijala. Na primjer, materijali kao što su titan se već pri brzinama od 100 m/min smatra HSM područje, dok se pri obradi aluminija u to područje ulazi s brzinama oko 1000 m/min. Velika prednost visokobrzinske obrade se očituje u odličnom odvođenju topline iz zone rezanja što je prvi uočio C. Salomon. Utvrdio je da povećanjem brzine rezanja u određenom području brzina dolazi do smanjivanja temperature rezanja, te je to smatrao kao ulazak u područje visokobrzinske obrade (Slika 52) [27].



Slika 52. Dijagram ovisnosti temperature o brzini rezanja [27]

Kasnijim istraživanjima je utvrđeno da to ipak nije istina, već pri određenim brzinama rezanja temperatura prestaje naglo rasti, a daljnjim povećanjem ipak raste ali mnogo sporije. Odvođenje topline se odvija tako da veliki dio topline odlazi s odvojenom česticom jer se ne stigne prenijeti na obradak. S HSM se postiže veliki pomak u produktivnosti i efikasnosti obrade jer se s većim brzinama postižu kraća komadna vremena, kraće vrijeme isporuke a ujedno i veća fleksibilnost. Mali unos topline u obradak i smanjenje sila rezanja otvara mogućnost obrade tankostjenih profila te se ostvaruje bolja kvaliteta površine. Sada se za isto vrijeme može odraditi mnogo više prolaza (s manjim korakom između dvije putanje alata) čime se smanjuje teorijska hrapavost obrađene površine ( $R_t$ ) i minimalizira potrebu za ručnim doradama kalupa, što je prikazano na slici 53 [27].



**Slika 53. Postignuta visina profila tradicionalnom (crveno) i HSM (plavo) obradom [28]**

Iako je bila poznata čak sredinom prošlog stoljeća HSM se ostvarila tek u novije vrijeme zbog brojnih tehničkih barijera koje je sa sobom nosila. Ograničenja su se odnosila na alatni stroj i alat [27].

Zahtjevi za alatni stroj: linearni motori (posmična gibanja velikih brzina i ubrzanja do  $20 \text{ m/s}^2$ ), motor vreteno (glavno gibanje), brza upravljačka jedinica, čitanje blokova NC koda unaprijed (eng. Look-ahead), konstrukcija postolja od mineralno lijeva ili metalne konstrukcije kod većih strojeva.

Zahtjevi za alat su: materijal (visoke tvrdoće i žilavosti), odgovarajuća prevlaka (postojanost oštrice i kemijska postojanost), postojanost pri visokim temperaturama, HSK prihvat (obavezno balansiranje).

Bitno je shvatiti veliku ulogu prevlake alata u HSM koja osigurava toplinsku izolaciju, postojanost rezne oštrice i omogućuje visoke brzine rezanja. Odlične karakteristike prilikom obrade metala povećane tvrdoće i super-legura na bazi nikla i kobalta se pokazala prevlaka od

kubičnog nitrida bora (eng. Cubic boron nitride, CBN). Stoga korištenjem alata s prevlakom CBN ili pločica od CBN-a uz ispunjene sve ostale uvjete prihvata i alatnog stroja, moguće je postići puni potencijal HSM obrade.

Alatničarska industrija je jako konkurentna i svaki pomak u produktivnosti i efikasnosti je jako bitan. Iz tog razloga se u posljednje vrijeme često govori o glodanju velikim posmacima (eng. High feed milling, HFM) upravo zbog svojih ogromnih prednosti u produktivnosti. Usredotočeno je isključivo na uklanjanje što više materija u jedinici vremena te je moguće postići čak do tri puta veći učinak. Potrebni je koristiti posebne alate s prilagođenim kutom rezne oštrice kako bi stabilizirali obradu i smanjili vibracije koje su česta pojava (Slika 54). To se postiže s manjim kutom namještanja (napadnim kutom) rezne oštrice ( $\chi_r$ ) pri čemu se smanjuje radijalna i povećava aksijalna sila, a samim time zahtjeva mnogo kruće strojeve. Karakteristika ovakve obrade je da se obrada vrši manjom dubinom rezanja (do 0,75 mm), uz mnogo veći posmak po zubu (do 1.2 mm/zubu) [10], [29].



Slika 54. Glodaća glava (fourworks) za High feed milling [10]

**Čitanje unaprijed (Look-ahead)** funkcija upravljačke jedinice stroja omogućuje čitanje od nekoliko do nekoliko stotina blokova NC koda unaprijed. Ovom funkcijom se postiže do deset puta veće brzine i istovremeno točnije obrade 3D kontura naspram obrade strojevima bez nje. Potreba za razvojem te funkcije pojavila se porastom kompleksnosti proizvoda. Na primjeru alata za tlačni lijev često postoje male površine s jako kompleksnom geometrijom na kojima stroj bez te funkcije nikad ne može postići svoj puni potencijal odnosno punu brzinu zbog naglog ubrzavanja i naglog kočenja. Mnogo prije su programeri na prijelazu između dvije ravnine umetali linije koda bez usporavanja kako bi stroj prešao na drugu ravninu s minimalni kočenjem, inače bi stroj usporio dok bi se pozicionirao u sljedeću točku a tek onda nastavio obradu sljedeće ravnine. Danas čitanjem nekoliko stotina blokova unaprijed upravljačka jedinica prepoznaje kritične točke i optimizira posmak tako da postigne najbližu moguću vrijednost programski zadanog posmaka. Za to je potrebno optimizirati putanju alata dodatnim



točkama što povećava količinu podataka koju je potrebno pročitati i obraditi. Rezultat takvog pristupa omogućuje interpolaciju putanje alata od 0,1 pa čak do 0,025 mm čime se postiže jako dobra točnost uz mnogo veću produktivnost. Problem se može pojaviti prilikom prevelikog porasta broja točaka čime veličina NC koda može narasti do 100 megabajta za što je potrebna mnogo brža DNC komunikacijska mreža [29].

Prednosti funkcije čitanja unaprijed [29]:

- Mnogo veće brzine rezanja i posmaci
- Veća produktivnost i iskorištenje strojeva
- Točniji izradak (uglavnom nije potrebna nikakva ručna dorada)
- Mirniji rad stroja (nema naglih kočenja)

Nedostatci funkcije čitanja unaprijed [29]:

- Potrebna mnogo brza upravljačka jedinica
- Potrebna mnogo brža komunikacijska mreža

### **3.2.5. Tvrda obrada**

Tvrdom obradom (eng. Hard machining) se smatra obrada materijala povišene tvrdoće koja ide i do 65 HRC. Svoju primjenu pronalazi najčešće u alatničarstvu i automobilskoj industriji. Pri obradi kompleksnih geometrija kalupa ili dijelova visoke tvrdoće koristila se isključivo tehnologija EDM jer materijali i strojevi nisu imali mogućnost ispuniti sve tehničke zahtjeve za tvrdnu obradu. To se mijenja razvojem novih reznih alata i prevlaka, visokobrzinskom obradom s minimalnom količinom SHIP-a ili suhom obradom te korištenjem strojeva visoke snage, krutosti i točnosti. Razvojem tvrde obrade se žele postići bolja točnost, kvaliteta obrađene površine i veća produktivnost nego s klasičnim metodama pomoću EDM. Obrada se ostvaruje pri bitno većim brzinama i posmacima, ali malim dubinama rezanja (<0,2 mm) kako bi se izbjegle znatne deformacije reznog alata. Bitno je postići ravnomjerno opterećenje alata optimiziranjem putanje i predviđanjem kritičnih točaka tijekom obrade. Uporaba SHIP-a se izbjegava i teži se ka suhoj obradi. Većina topline nastaje u zonama dodira alata i obratka, međutim većina se odvodi odvojenom česticom dok se dio ipak zadržava u reznom alatu, a zbog uporabe SHIP-a dolazi do temperaturnog šoka rezne oštrice, opasnosti preranog trošenja i krzanja. Kao materijal reznih alata za tvrdnu obradu CBN je zbog svoje tvrdoće, otpornosti, temperaturne postojani i inertnosti ka ugljiku u čeličnim materijali pokazao najbolja svojstva. Iz tog razloga CBN kao materijal svoj puni potencijal pokazuje prilikom tvrde obrade i obrade super legura na bazi nikla i kobalta [27].

Karakteristike tvrde obrade [27]:

- Smanjenje sile rezanja povećanjem brzine
- Potrebni kvalitetniji alati
- Najčešće suha obrada
- Veći zahtjevi za stroj (krutost, snaga, upravljanje, brzina)
- Veća produktivnost

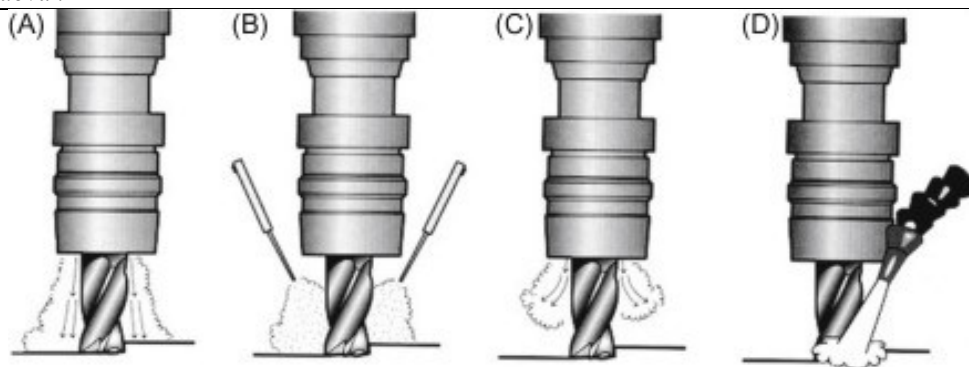
### 3.2.6. *Suha obrada*

Tradicionalna obrada s velikim količinama SHIP-a ima izrazito nepovoljan utjecaj na okoliš, visoku cijenu primjene te loše utječe na zdravlje operatera pri čemu može doći do kožnih oboljenja i problema s disanjem. Ipak SHIP ima jako bitnu ulogu u procesu obrade zbog hlađenja komada i rezne oštrice, ispiranja zone rezanja i odvođene odvojene čestice te podmazivanje za manje trošenje alata i manje sile rezanja. Za potpuno uklanjanje SHIP-a iz procesa potrebno je koristiti odgovarajuće alate i prevlake. Prednji kut alata je najčešće oko 30° uz prevlaku za suhu obradu, a često i materijal alata od CBN-a ili dijamanta [27].

Ima nekoliko varijanti „suhe“ obrade, a najznačajnije su [27]:

- Suha ili skoro suha obrada (eng. Dry machining ili near dry machining)
- Obrada s minimalnom količinom sredstva za podmazivanje (eng. Minimum quantity lubrication, MQL)
- Obrada s minimalnim hlađenjem (Minimum quantity cooling, MQC)
- Obrada s minimalnom količina hlađenja i podmazivanja (Minimum quantity cooling lubricant, MQCL)

Najčešća je primjena MQL obrade, a omogućuje parametre i uvjete obrade gotovo kao i s velikim količinama SHIP-a uz brojne prednosti. Ostvaruje se na principu aerosola tako da se jako mala količina ulja raspršuje u struju stlačenog zraka i dovodi se u zoni rezanja. S time je ispunjen uvjet podmazivanja uz hlađenje pomoću struje zraka. Također je važno dovesti SHIP na pravo mjesto što je gotovo nemoguće kod velikih brzina pri velikom broju okretaja, stoga se često primjenjuje hlađene kroz glavno vreteno odnosno alat.



**Slika 55. Način dovođenja SHIP-a [31]**

Na slici 55 su prikazani načini dovođenja SHIP-a pri čemu se: MQL ili zrak dovodi u zonu rezanja raspršivanjem kroz glavno vreteno (A) za što je potrebno koristiti prilagođene prihvate (Slika 56), raspršivanjem MQL-a kroz mlaznice izvana (B), dovođenje SHIP-a pod visokim tlakom kroz glavno vreteno ili alat (C) te zadnja i najgora opcija dovođenje velikih količina SHIP-a mlaznicom izvana (D).



**Slika 56. Coolcap prihvatili namijenjeni za hlađenje kroz glavno vreteno**

### 3.3. Obrada elektro-erozijom (EDM)

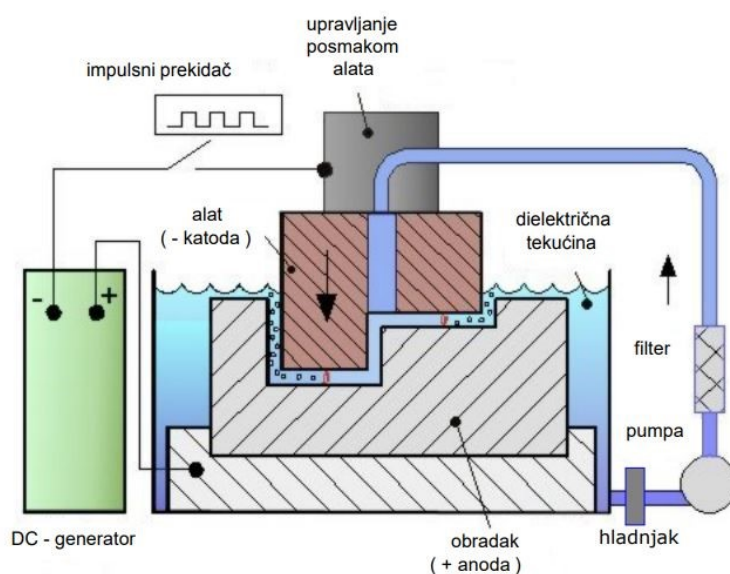
Obrada elektro-erozijom (eng. Electrical discharge machining, EDM) spada u postupke obrade odnošenjem ili nekonvencionalne obrade. Odvija se na principu električnog pražnjenja elektroda, odnosno obratka (anode) i alata (katode) spojenih na istosmjernu struju DC generatora i uronjeni u dielektričnu tekućinu. Približavanjem elektrode dolazi do preskakanja iskre na mjestu gdje je najmanji razmak između komada i elektrode, što uzrokuje zagrijavanje, taljenje i isparavanje materijala pod utjecajem jako visokih temperatura (6000 – 12000 °C). Na taj način se stvaraju mali krateri te se ispiranjem i stalnom cirkulacijom dielektrične tekućine uklanja materijal iz zone obrade. Postupak se dijeli na elektro-eroziju umakanjem i žicom. U slučaju umakanja alat (žig) naziva se elektroda, dok kod postupka žicom elektroda je upravo žica [32].

Neke od karakteristika nekonvencionalnih obrada [32]:

- Alat za obradu ne treba biti tvrdi od obratka
- Ne dolazi do fizičkog kontakta alata i obratka
- Za proizvodnost i kvalitetu obrade su bitna fizička svojstva (električna i toplinska vodljivost), dok su mehanička svojstva manje bitna (tvrdoća, čvrstoća, žilavost)

#### 3.3.1. Elektro-erozija umakanjem (žigom)

EDM umakanjem se izvodi na strojevima erozimatima (Slika 57 i 58). Osnovni dijelovi stroja su: DC-generatora, uređaj za reguliranje impulsa, alat, sučelje za upravljanje posmakom, dielektrična tekućina s pumpom, filterom i uređaj za hlađenje.



Slika 57. Shema erozimata [32]

Utjecajni parametri na obradu elektro-erozijom [32]:

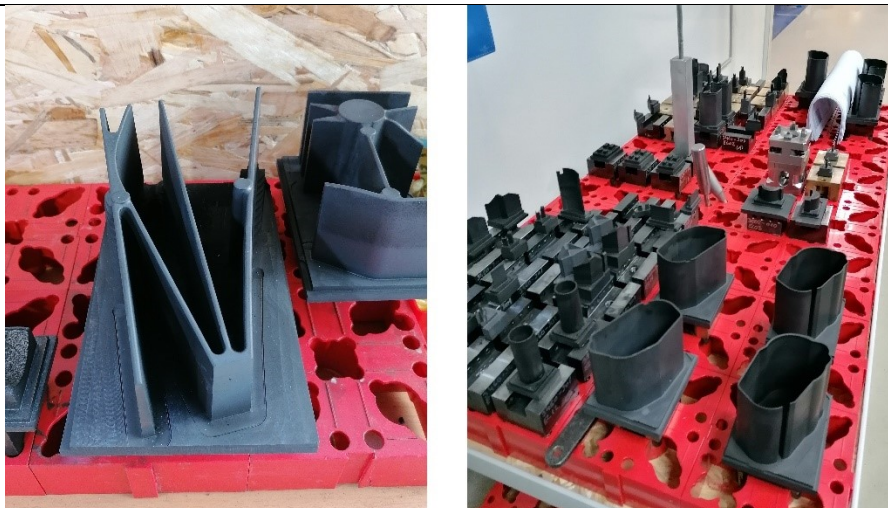
- Jakost struje i pol (najčešće obradak +, a elektroda - )
- Udaljenost elektroda (eng. gap) – 5 do 400 mikrometara
- Trajanje impulsa (gruba obrada – dugi impuls, kratki impuls oko 1 ms – fina obrada)
- Dielektrik i hlađenje



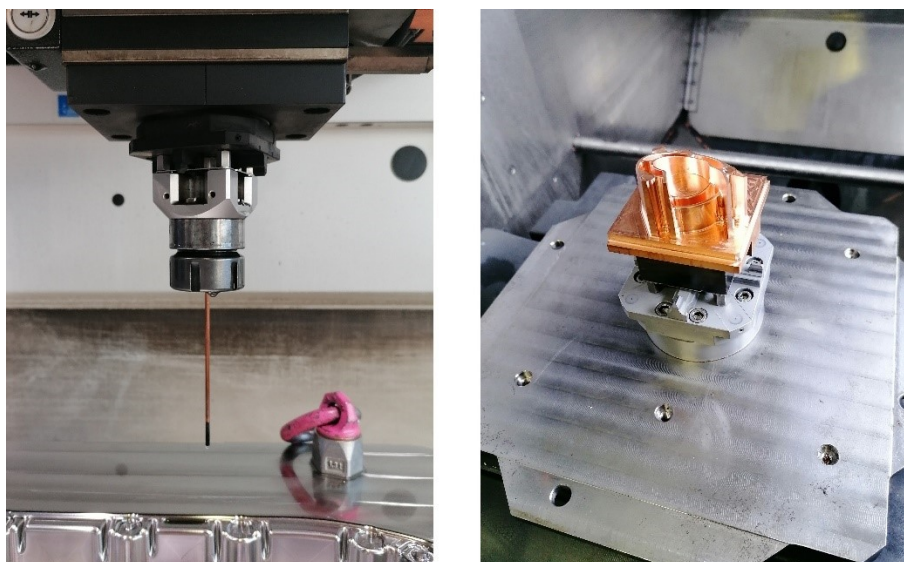
**Slika 58. Eroziomat GF P800 s upravljačkom jedinicom**

Dielektrična tekućina služi kao izolator sve dok napon ne prijeđe kritičnu vrijednost te tada dielektrik postaje vodljiv, u tom trenu iskra preskače i ima dovoljnu snagu za taljenje komada i stvaranje kratera. Iskra može preskakati s katode na anodu ili obrnuto. Najčešće se postavlja da je obradak anoda čime se postiže manje trošenje elektrode uz veću sigurnost da neće doći do oštećenja komada. Bitno je postaviti dobre parametre obrade jer prevelikim parametrima dolazi do prekomjernog zagrijavanja i pojave zaostalih naprezanja u komadu. Iz tog razloga jako je bitno strujanje, filtriranje i hlađenje dielektrika. Visokim temperaturama u zoni obrade dolazi do zagrijavanja dielektrika, stoga je potrebno hlađenje. Uz to strujanje i filtriranje sprječava zasićenje odvojenim česticama u zoni obrade te ispiranje i odvođenje topline. Uz navedena svojstva dielektrik mora imati visoku točku zapaljenja, antikorozivna svojstva uz nisku cijenu (npr. mješavina tehnološke vod, mineralnog ulja, transformatorskog ulja) [32].





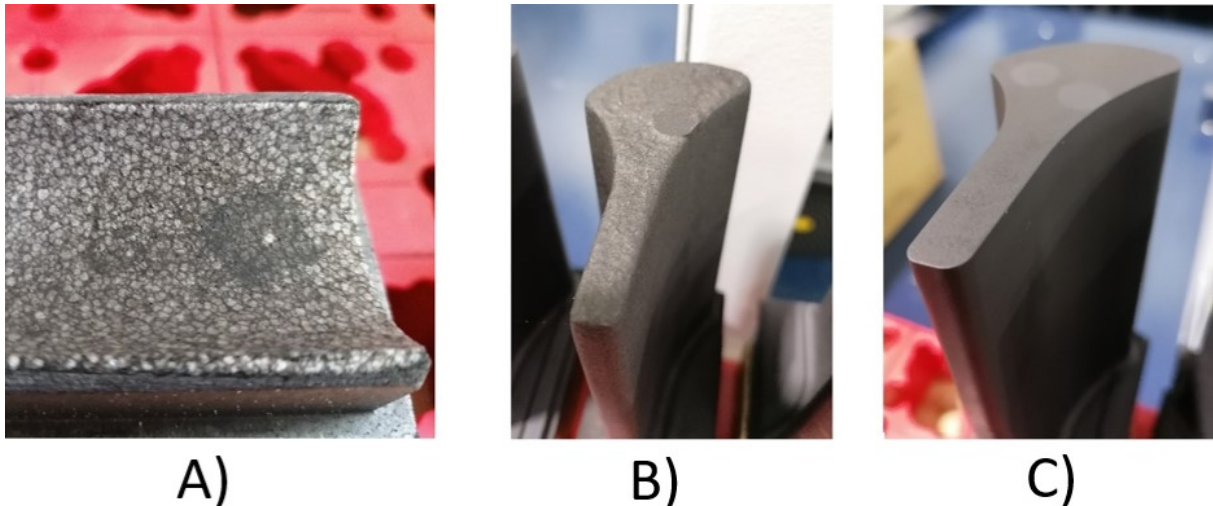
Slika 59. Elektrode od grafita



Slika 60. Bakrene elektrode

Materijali za elektrode su najčešće grafit (Slika 59), bakrene legure (Slika 60), ali mogu biti i od aluminijских legura i nehrđajućeg čelika. Mogu biti jednostavne ili kompleksne geometrije jer je potrebno napraviti negativ komada koji se obrađuje [32]. Najčešće se izrađuju glodanjem. Za EDM se najčešće koristi gruba i fina elektroda jer zbog jakog iskrenja dolazi do znatnog trošenja grube elektrode. Stoga je za postizanje uskih dimenzijske točnosti i zadovoljavajuće hrapavosti površine potrebno koristiti i finu elektrodu. Ona djeluje s manjim zazorom (gap-om) i kraćim impulsima čime je moguće postići hrapavost površine i do  $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ . Mogućnost raznih kombinacija parametara obrade mogu se postići raznolike vrijednosti hrapavosti površine, a samim time veća fleksibilnost tehnologije jer je ponekad na specifičnim komadima zaista potrebna hrapavost veća od  $Ra = 25 \mu\text{m}$ . Trošenje elektroda je prikazano na slici 61, te se na slici 61 (A) mogu uočiti jako veliki krateri nastali tijekom jakog iskrenja za vrijeme grube

obrade pri čemu su parametri obrade postavljeni i do 50 posto viši, zbog potrebne hrapavosti od  $Ra = 25 \mu\text{m}$ . Na ostale dvije slike se mogu usporediti gruba (B) i fina (C) elektroda te njihovo stanje nakon obrade, pri čemu je fina elektroda gotovo netaknuta dok gruba ima uočljive znakove korištenja.



**Slika 61. Stanje elektroda nakon obrade: jako gruba (A), gruba (B) i fina (C)**

Karakteristike EDM obrade [32]:

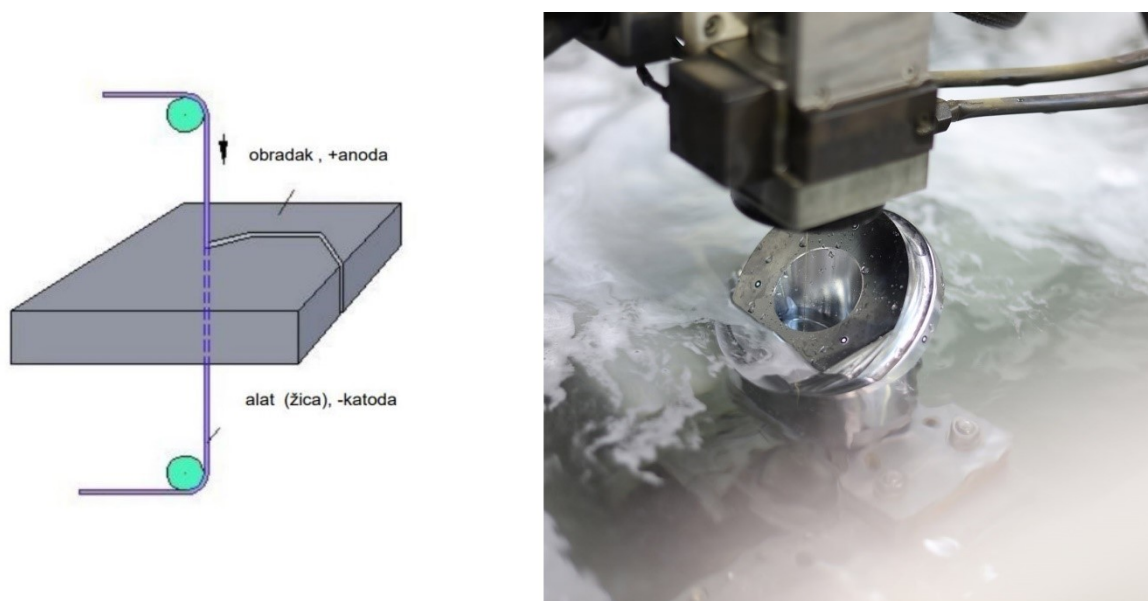
- Proizvodnost  $<10000 \text{ mm}^2/\text{min}$
- Može se postići od  $Ra=0.1$  do  $Ra=0.8$  mikrometara
- Točnost dimenzija  $0,002-0,02 \text{ mm}$
- Potrebno je odvoditi, filtrirati i hladiti dielektričnu tekućinu
- Potrebno je koristiti više elektroda (gruba i fina)
- EDM je povoljna za pojedinačnu proizvodnju

EDM primjenu pronalazi u obradi teško obradivih, ali samo električno vodljivih materijala (npr. tvrdi metal ili visoko kaljeni čelik). Najčešće se koristi u alatničarstvu i izradi dijelova na mjestima gdje je potrebno postići male radijuse zaobljenja, teško dostupna rebra, oštre prijelaze ili pak slijepih provrta malog promjera a velike dubine [32].

### 3.3.2. Elektro-erozija žicom

Elektro-erozija žicom se odvija na strojevima erozimatima s alatom žicom (katoda) i obratkom (anoda). Žica može biti od bakrene legure ili od volframa, pri čemu se bakrene žice koriste češće i imaju promjer  $0,25 \text{ mm}$ , dok volframova žica može imati promjer od  $0,02$  do  $0,08 \text{ mm}$ . Stroj je također opremljen s DC-generatorom i upravljanjem. Funkcionira na način da se žica odmata je jednog kalema i namata na drugi pri čemu prolazi kroz safirne vodilice. Jako je bitno

da su vodilice dobre kvalitete kako bi zadržale preciznost i bile otporne na trošenje. Nakon obrade iskorištena žica na drugom klemu se baca jer dolazi do trošenja, a ponovnom uporabom bi se pojavilo prečesto pucanje i prekidanje operacije. Kao dielektrik služi deionizirana voda. Ova tehnologija zbog svoje fleksibilnosti i funkcionalnosti ima veliku primjenu u alatničarskoj industriji. Mogu se obrađivati od najmanjih do jako velikih komada. Glavna primjena joj je rezanje usko toleriranih prolaznih provrta i kontura kod jako tvrdih i teško obradivih materijala. Često dolazi do velikih ušteda primjenom ove tehnologije jer je ponekad glodanjem ili bušenjem jako teško postići neke tolerirane dimenzije. Za klasični EDM žicom je potrebno tehnološki predvidjeti provrt za provlačenje žice. Noviji strojevi imaju funkciju samo provlačenja žice čime se skraćuje proces i otvaraju nove mogućnosti jer nema potrebe za bušenjem provrta za provlačenje. Također neki strojevi imaju funkciju pomicanja vodilica čime stroj ima dodatni stupanj slobode a samim time mogućnost rezanja mnogo kompleksnijih geometrija [32].



Slika 62. EDM žicom [32]

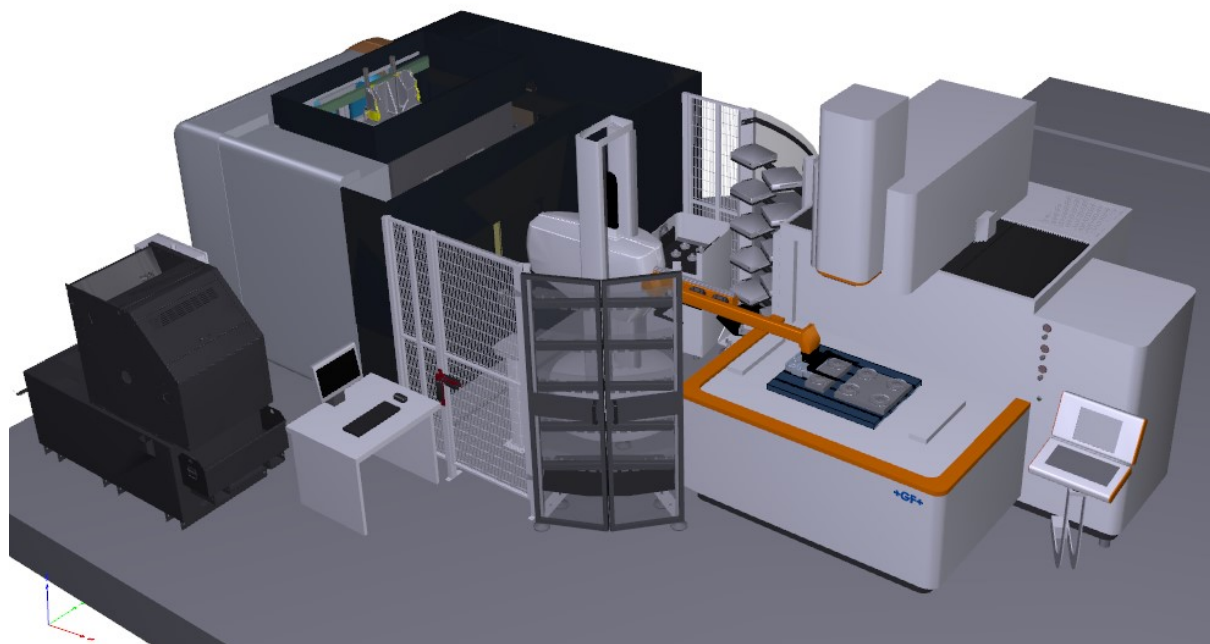


#### 4. ALGORITAM RADA FLEKSIBILNOG OBRADNOG SUSTAVA ZA OBRADU ELEKTRO-EROZIJOM

Fleksibilni proizvodni sustav realiziran u Teh-Cut-u integrira nekoliko bitnih elemenata kako bi se postigla fleksibilnost i autonomija sustava.

Osnovni elementi koji čine sustav su:

- glodači obradni centar (HSC 55 Linear, Slika 44)
- stroj za elektro-eroziju (erozimat GF P900, Slika 58)
- manipulator za transport obradaka i alata (elektroda)
- glavno upravljačko računalo s potrebnim softverima
- stanica za ulaganje paleta (obradaka)
- stanica za sušenje i cijedenje obradaka
- postolje za držače paleta
- skladište obradaka (palette)
- skladište alata (elektrode)
- koordinatni mjerni uređaj



Slika 63. Fleksibilni proizvodni sustav za obradu elektro-erozijom

Ovaj FMS ima jako bitnu ulogu u proizvodnji samim time što se koristi isključivo za završnu obradu, najčešće matrica i klizača alata za tlačni lijev. Iz tog razloga potrebna je visoka pouzdanost i točnost sustava uz kvalitetnu izvedbu NU alatnih strojeva. Svaka greška u završnoj fazi proizvodnje uzrokuje dodatne troškove dorade ili u najgorem slučaju škart, što može uvelike smanjiti profit i konkurentnost cijele kompanije.

Osnovni ciljevi instalacije FMS-a su:

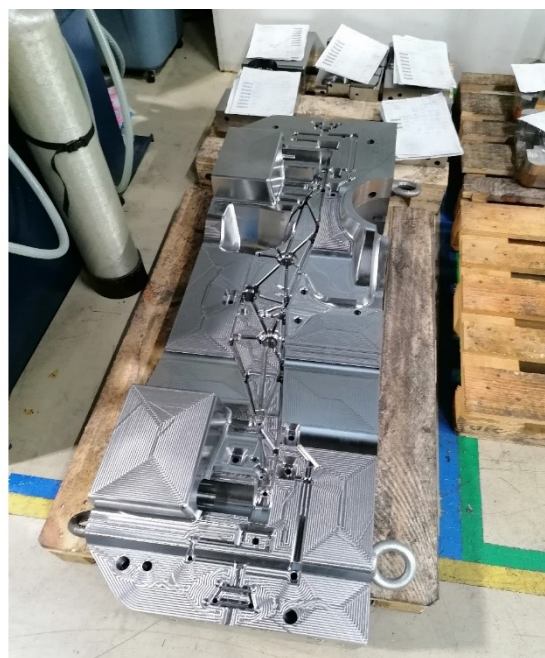
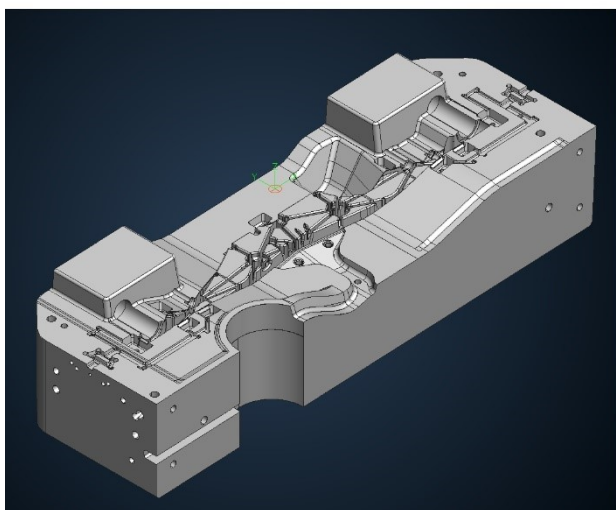
- Povećati produktivnost i učinkovitost strojeva radom 24/7
- Povećati fleksibilnost i autonomnost sustava
- Povećati kvalitetu proizvoda i eliminirati ljudske greške
- Smanjiti proizvodne troškove i skratiti vrijeme isporuke

Ipak uz sve navedeno potreban je školovan operater koji može iskoristiti puni potencijal ovakvog sustava. Za upravljanje sustavom su potrebna informatička znanja uz odlično razumijevanje tehnologije obrade i procese koji se odvijaju u FMS-u. U nastavku je opisan algoritam proizvodnje dijelova alata, pri čemu se dio označen crvenim poljima odvija izravno u fleksibilnom obradnom sustavu.



Slika 64. Algoritam rada FMS-a na primjeru proizvodnje matrica

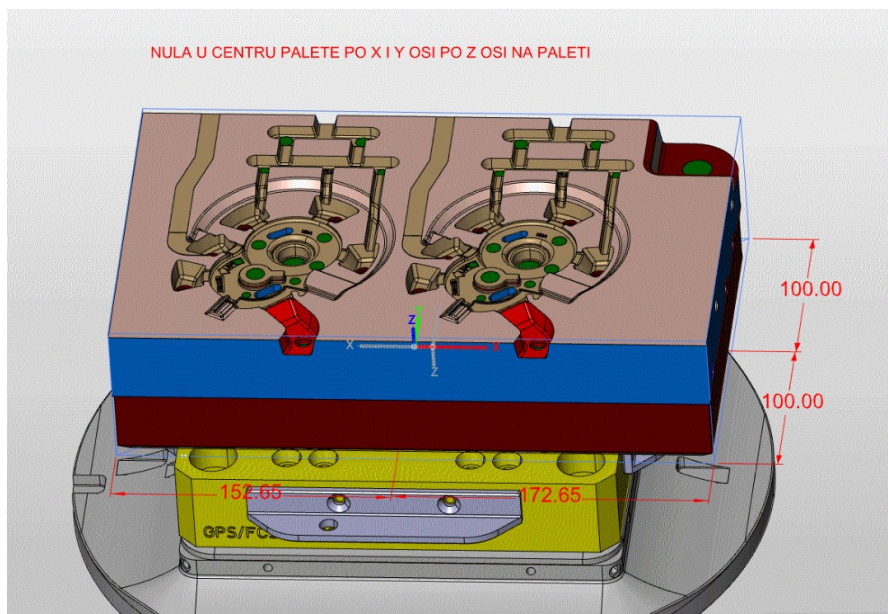
- 1) **CAD/CAM sustav** - Izrada svakog alata započinje u uredu zaprimanjem 3D modela gotovog proizvoda. Zadaća konstrukcije je razvijanje novog alata iz kojeg se mora dobiti točno taj željeni proizvod. Neki od softvera koji se koriste za konstruiranje su: Catia, PTC Creo, ili SolidWorks. Cilj je osigurati 3D model svih komponenti alata kako bi tehnolozi korištenjem CAM softvera odabrali tehnologiju i strategiju obrade te generirali NC program za izradu tog komada. U automatiziranom procesu tehnologija je od presudne važnosti, te je tehnologije prenesena većinska odgovornost za sam proces obrade. Tehnolozi koriste baze podataka za odabir standardiziranih i testiranih parametara obrade čime se uvelike ubrzava proces programiranja. Potrebno je programirati strojeve za sve faze obrade od grube do završne obrade glodanja te glodanje elektroda i CMM-a ako je potrebno. Na slici 65 je prikazan primjer izrađene matrice na temelju 3D modela nastalog u konstrukcijskom uredu.



**Slika 65. Prikaz 3D modela lijevo i gotovog komada desno**

- 2) **Gruba obrada** – Prva faza uvijek je poravnanje ili formatiranje komada. Sirovi materijal koji se koristi za izradu matrica dolazi u blokovima, lijevanim ili valjanim. Kako bi se izbjegle kolizije ili prevelik dodatak komada potrebno je poravnati komad te napraviti tolerirane i standardizirane provrte za stezno-centrirajuće prstene. Komad se steže na paletu ili stol stroja preko točno definiranih točaka koje su zadane uputstvima za obradu gdje je opisan princip stezanja (Slika 66). Potrebno je osigurati stezno-centrirajuće elemente i vijke. Tada je komad spreman za grubu obradu. Obrada se sastoji od uklanjanja viška materijala do dodatka za završnu obradu i bušenja. Buše se kanali

za temperiranje odljevka, što zahtijeva korištenje strojeva s većom silom i momentom. Kanali za temperiranje su neophodni za pravilno i ravnomjerno hlađenje odljevaka. Buše se u ovoj fazi isključivo zbog tvrdoće jer bi se nakon kaljenja jako teško izbušili. Koriste se svrdla i do 20x D od tvrdog metala s raznim prevlakama.



Slika 66. Uputstvo za pravilno stezanje obratka

- 3) **Toplinska obrada** – Materijali alata za tlačni lijev su izloženi jako visokim temperaturama te je potrebna tvrdoća kako bi bili otporni na sve negativne utjecajne parametre taline. Najčešće se kaljenje odvija kod pouzdanih kooperanata kako se ne bi desio prekid lanca opskrbe ili kašnjenje alata. Matrice se kale na 46 – 50 HRC dok se neki umetci kale i do 60 HRC, stoga je ponekad neophodno koristiti alate za tvrdu obradu.
- 4) **Fina obrada** – Ovaj korak u proizvodnji je prva faza korištenja FMS-a pri čemu je prethodno potrebno poravnati donju stranu matrice i proširiti provrte za prstene. Svrha takvog postupka je ponovno pozicioniranje koje će vrijediti za sve iduće korake pa čak i naknadne dorade ili modifikacije. Provrte se proširuju za 1 mm i nakon postavljanja prstena mogu se stegnuti na paletu. Paleta se provjerava da li ima ispravan čip te se umeće na stanicu za ulaganje obradaka u FMS. Zatim se zadaje naredba preko softvera za umetanje obratka u regalno spremište. Potrebno je preuzeti NC program s glavnog računala te povezati s ID kodom čipa na paleti i pozicijom u spremištu. Također je potrebno pripremiti i izmjeriti sve potrebne alate. Cijela priprema se vrši paralelno dok se prethodni komad obrađuje kako bi učinak stroja bio maksimalan.



**Slika 67. Umetanje obradaka na stanicu za ulaganje**

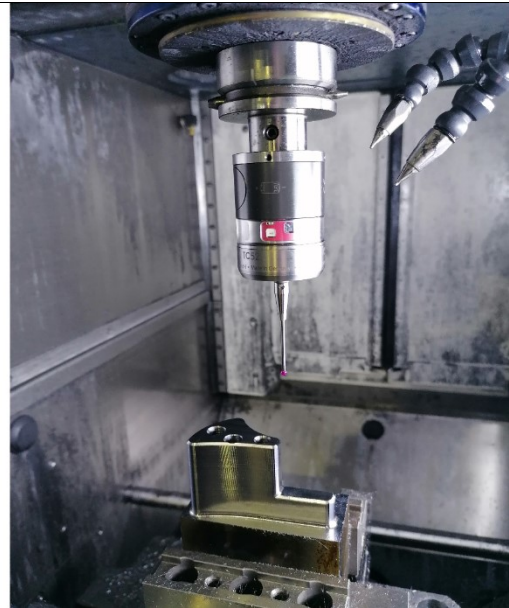
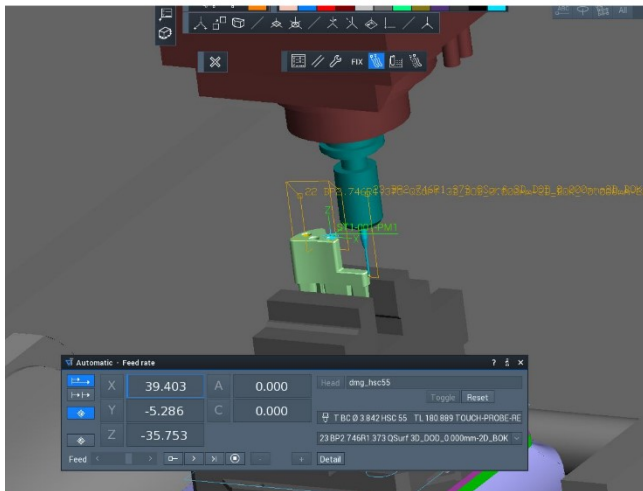
Fina obrada se može podijeliti na 3 dijela :

1. Polu-fina obrada
2. Obrada toleriranih ravnina i kontura
3. Obrada forme

Pulu-fina obrada skida višak materijala (oko 0,5 – 1 mm) nakon te ostavlja dodatak do 0,05 mm za naknadnu obradu. dodatak se ostavlja zbog mogućih deformacija tijekom kaljenja.

Izrada ravnina i kontura stvara najveći problem tijekom automatizacije procesa jer je potrebno postići jako usko tolerancijsko polje, ponekad i do 0,01 mm. Kao rješenje toga se koristi Renishaw ticalo i TEBIS-ov modul za automatsko uzimanje korekcija alata. Postupak se izvodi tako da ticalo dotakne komad u nekoliko točki i odredi koliku treba upisati korekciju na dimenzije alata kako bi postigao programski zadanu mjeru (Slika 68). Zatim se program vrati na blok pozivanja alata te ga pozove s upisanom korekcijom i ponovi taj dio programa. Proces se najčešće ponovi jednom, a može se ponoviti nekoliko puta što može biti znak zatupljenosti alata.

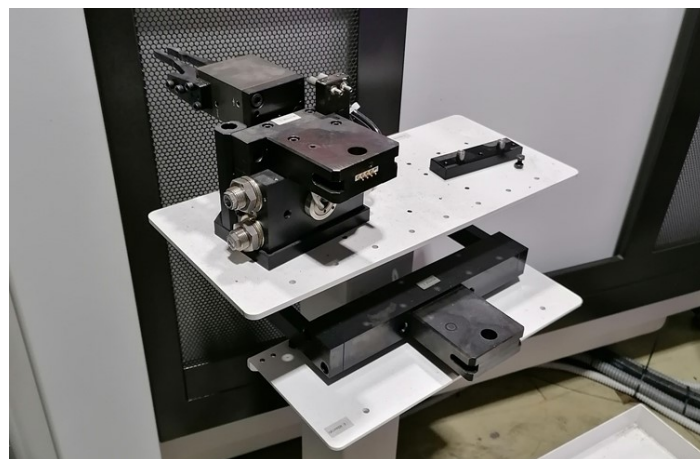




**Slika 68. Automatsko upisivanje korekcija alata**

Treća dio fine završne obrade je najčešće kopirno glodanje koje nerijetko traje jako dugo, iako se izvodi HSM parametrima obrade i s MQL načinom hlađenja i ispiranja pomoću uljne maglice. Obrada se najčešće izvodi alatima s velikim radijusom zaobljenja kao što su kuglasta glodala i glodala s radijusom kako bi kvaliteta i hrapavost obrađene površine bila zadovoljavajuća.

- 5) **Glodanje elektroda** - Za izradu elektroda je potrebno napraviti pripremu grafitu rezanjem na potrebne dimenzije. Nakon lijepljenja na Erowa paletu za EDM postavljaju se u spremište te se svaku također pomoću čipa povezati s NC programom. Pozivanjem programa za obradu elektrode manipulator automatski postavlja u stroj adapter paletu s Macro referentnim sustavom. Zatim se držač paleta mijenja s držačem za prihvate elektroda te uzima elektrodu i postavlja ju na adapter paletu.



**Slika 69. Držač za prihvate elektroda**



**Slika 70. Prikaz elektrode iz TEBIS-a : 1 segment (lijevo), sklop ( desno)**

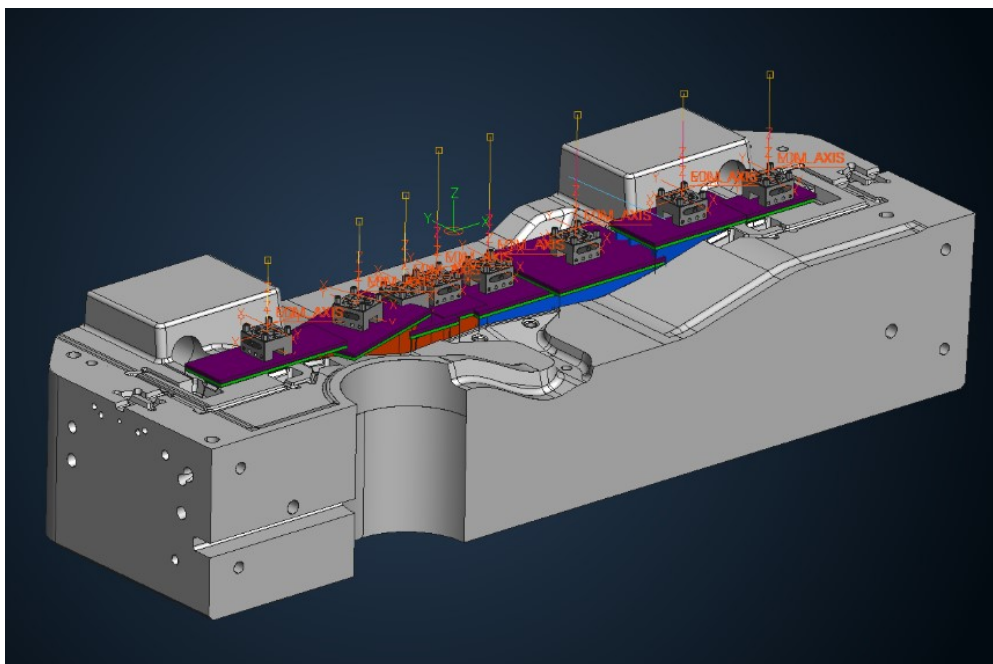
Elektroda se obrađuje s parametrima obrade karakterističnim za HSM i HFM. Potrebno je koristiti SHIP zbog raspršivanja jako malih čestica grafita u zraku. Poželjno je koristiti Coolcap prihvate koji ispiranjem kroz vreteno stvaraju sloj SHIP-a oko alata te sprječavaju raspršivanje odvojenih čestica te štiti vreteno i ležaje od oštećenja uslijed nakupljanja sitnih čestica.



**Slika 71. Spremište alata (elektroda) i obradaka**



- 6) **Elektro-erozija** – Nakon glodanja elektrode se mjeri na CMM uređaju te se korekcije preko sučelja automatski šalju na upravljačku jedinicu erozimata. Jedan primjer mjernog izvještaja EDM elektrode je prikazan na Slika 35. Erozimati je kao i svi ostali strojevi opremljen s paletnim sustavom čime se uz AIA omogućuje i AIO te potpuno automatski rad.

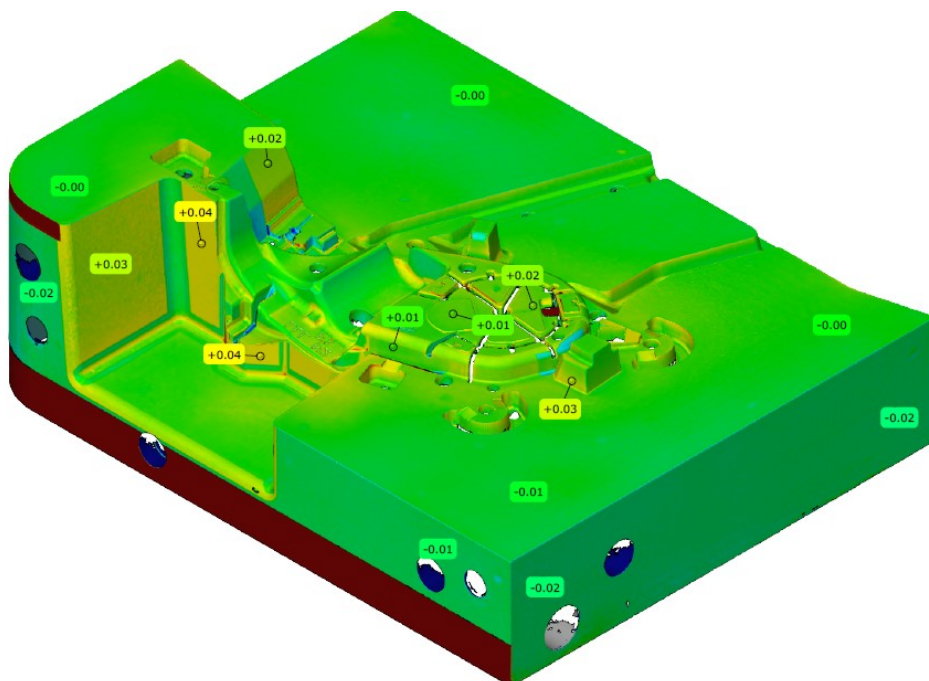


Slika 72. Primjer simulacije erodiranja i pozicije erodiranja



Slika 73. Primjer pozicioniranja prije erodiranja

- 7) **Kontrola** – Završetkom procesa obrade vrši se kontrola. Najprije vizualna a zatim s CMM uređajem ili češće s 3D skenerom. 3D skener omogućuje mnogo veću fleksibilnosti prilikom mjerenja (snimanja) kompleksnih geometrija, također omogućuje jako dobar vizualni prikaz nastalih odstupanja ili deformacija prilikom utjecaja temperature. Za dolje prikazani mjerni izvještaj koristio se Atos III Triple Scan uz softver ATOS Professional 2016 koji sadrži modul za mjerenje i usporedbu sa stvarnim 3D modelom.



Slika 74. Mjerni izvještaj 3D skenera



Slika 75. Greške prilikom EDM: pređuboko erodirano (plavo), višak materijala (crveno)

- 8) **Dorada** – Cilj današnje proizvodnje je da svaki proizvod bude točan iz prve, bez dorada ili modifikacija. Ipak, ponekad se može dogoditi greška kao na Slika 75. Nakon utvrđenih greški i nedostataka potrebno je komad vratiti na stroj i doraditi. Komad se ponovno steže na paletu s istim pozicijama nul-točke. Takav postupak nam uvelike olakšava kod naknadnih dorada i modifikacija pri čemu je maksimalna greška ovog načina pozicioniranja, zamak do 5  $\mu\text{m}$ .

## ZAKLJUČAK

Porastom konkurencije na tržištu i sve veći zahtjevi za personaliziranim proizvodima uzrokuju brojne promjene u industrijskoj proizvodnji. Kako bi odgovorile novim zahtjevima na tržištu, kompanije trebaju ulagati u nove tehnologije, kvalitetu proizvoda, automatizaciju te težiti fleksibilnosti cijelog sustava. Primjena novih tehnologija i softvera zahtjeva integraciju proizvodnog sustava i otvara put ka potpunoj autonomiji te „inteligenciji“ sustava. Stepenica ka razvoju potpune autonomije je implementacija fleksibilnih obradnih sustava u proizvodnji s kojom se povećava fleksibilnosti, produktivnost i agilnost procesa. Za implementaciju FMS-a potrebno je standardizirati i optimizirati proizvodne procese te ispuniti brojne zahtjeve koji su opisani u ovom radu. Uspješne kompanije ulažu velike napore i financijska sredstva u razvoj i integraciju takvih sustava zbog mnogobrojnih prednosti i široke mogućnosti primjene. Implementacijom sustava koji integrira konvencionalne i nekonvencionalne postupke obrade omogućilo se mnogo veće iskorištenje strojeva, bolju kvalitetu proizvoda uz niže troškove proizvodnje što je odlika svake uspješne kompanije. Uz sve tehnološke aspekte bitno je naglasiti trendove u ekološkoj osviještenosti i održivosti proizvodnje što je u današnje vrijeme naročito bitno.

## LITERATURA

- [1] A. Caggiano : Factory Concept Implementation for FIMS and RMS Modelling and Analysis \_PhD\_Caggiano\_Alessandra-JAKO OK, 2009./10.
- [2] Yoram Koren : The Global Manufacturing Revolution , 2010
- [3] Thoben, Wiesner, Wuest : "Industrie 4.0" and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples , 2017
- [4] <https://www.bcg.com/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx> , pristupljeno : siječanj 2020.
- [5] <https://iiot-world.com/connected-industry/status-and-trends-in-the-global-manufacturing-sector/> , pristupljeno : siječanj 2020.
- [6] Godec, Damir, Šercer, Mladen (2015) Aditivna proizvodnja
- [7] Shivanand, Benal, Koti: Flexible manufacturing system, 2006.
- [8] Bradford: MAKINO, Die/mold automation: retool your business processes to improve productivity
- [9] <https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/standardizacija.pdf> , pristupljeno : veljača 2020.
- [10] <https://www.pokolm.de/de/> , pristupljeno : veljača 2020.
- [11] Fleischer, Denkena, Winfough , Mori: Workpiece and Tool Handling in Metal Cutting Machines, 2006.
- [12] <https://www.gfms.com/s3r> , pristupljeno : veljača 2020.
- [13] Workholding solutions catalogue.pdf, <http://www.jergensinc.com> : pristupljeno veljača 2020.
- [14] Damir Ciglar, predavanja : Obradni strojevi, FSB
- [15] <https://www.vichor.com/machining-centers/technology/choosing-the-proper-tool-magazine-for-cnc-machining-centers/> , pristupljeno : veljača 2020.
- [16] <https://dir.indiamart.com/impcat/product-designing.html> , pristupljeno : veljača 2020.
- [17] <https://www.hstec.hr/proizvodi/hsk> , pristupljeno : veljača 2020.
- [18] <https://ktc-gmbh.de/> , pristupljeno : veljača 2020.

- 
- [19] A. Stoić, Predavanja : Alati i naprave I , Slavonski Brod 2016.
- [20] <https://www.zoller.info/> , pristupljeno : veljača 2020.
- [21] <https://www.blum-novotest.com/> , pristupljeno : veljača 2020.
- [22] Renishaw katalog , preuzeto : veljača 2020.
- [23] Aberlink katalog , preuzeto : veljača 2020.
- [24] <https://www.foxvalleymetrology.com/> , pristupljeno : veljača 2020.
- [25] T. Udiljak, Predavanja : Proizvodnja podržana računalom – CAM , FSB
- [26] T. Udiljak, Predavanja : Obrada odvajanjem , FSB 2016.
- [27] T. Udiljak, Predavanja : Postupci obrade odvajanjem , FSB
- [28] <http://ing.unlpam.edu.ar/~material/tecmechanica/material/HSM.pdf> , pristupljeno : veljača 2020.
- [29] <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/six-points-you-must-know-about-high-feed-milling-> , pristupljeno : veljača 2020.
- [30] <https://www.mmsonline.com/articles/a-closer-look-at-look-ahead> , pristupljeno : veljača 2020.
- [31] W.Grzesik: Advanced Machining Processes of Metallic Materials (Second Edition), 2017
- [32] D.Ciglar, predavanja : ECM - EDM

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tlocrt fleksibilnog obradnog sustava za obradu elektro-erozijom realiziranog u tvrtki Teh-Cut



